Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité

CRIIRAD

Rapport N° 13-24

ETUDE DE LA RADIOACTIVITE DES CORAUX DU LAGON DE MANGAREVA (ILES GAMBIER, POLYNESIE FRANÇAISE)

Etude réalisée par le laboratoire de la CRIIRAD à la demande de la Délégation pour le Suivi des Conséquences des Essais Nucléaires (DSCEN)

Date de la mission : Juillet 2012
Date de rédaction du rapport : Année 2013

Responsable d'étude, coordination et rédaction du rapport : Bruno CHAREYRON, ingénieur en physique nucléaire
Responsable prélèvements : Christian COURBON, technicien spécialisé
Conditionnement des échantillons : Jocelyne RIBOUET, technicienne de laboratoire
Analyse des échantillons (spectrométrie gamma) : Stéphane PATRIGEON, technicien métrologue

LABORATOIRE DE LA CRIIRAD
471, Avenue Victor Hugo, 26000 Valence
☎ 04 75 41 82 50 🖹 04 75 81 26 48
http:/www.criirad.com laboratoire@criirad.com

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION 3

1.1 OBJECTIFS ET DEROULEMENT DE L'ETUDE 4
1.2 REMERCIEMENTS 4

2 CHOIX DES CORAUX A ECHANTILLONNER 6

3 DEROULEMENT DE LA MISSION AUX GAMBIER. 8

4 PRETRAITEMENT ET DATATION DES ECHANTILLONS 12

5 CHOIX DES METHODES ANALYTIQUES 15

5.1 RADIONUCLEIDES A RECHERCHER EN PRIORITE 15
5.2 ANALYSES PAR SPECTROMETRIE GAMMA 17
5.3 AUTRES TECHNIQUES ANALYTIQUES 18

6 RADIONUCLEIDES ARTIFICIELS EMETTEURS GAMMA 19

7 RADIONUCLEIDES NATURELS EMETTEURS GAMMA 20

8 ISOTOPES DE L'URANIUM 23

9 TRITIUM 26

10 CARBONE 14 27

11 STRONTIUM 90 28

12 ISOTOPES EMETTEURS ALPHA DU PLUTONIUM 30

13 CONCLUSION 32

ANNEXE 1 / NOTIONS SUR LA RADIOACTIVITE ET LISTE DES RADIONUCLEIDES LIES AUX ESSAIS NUCLEAIRES 35

ANNEXE 2 : CHAINES DE DESINTREGRATION RADIOACTIVE DES TROIS FAMILLES DE RADIOELEMENTS NATURELS 42

ANNEXE 3 : AGREMENTS DU LABORATOIRE DE LA CRIIRAD 45

ANNEXE 4 : RAPPORT DU CRIOBE (DATATION DES COLONIES DE PORITES)-3 PAGES 46

ANNEXE 5 : LISTE OFFICIELLE DES ESSAIS NUCLEAIRES ATMOSPHERIQUES FRANÇAIS EN POLYNESIE 49

1 Introduction

Au total, **46 essais nucléaires aériens** ont été réalisés en Polynésie française (dont 5 dits « de sécurité ») entre **juillet 1966 et septembre 1974**.

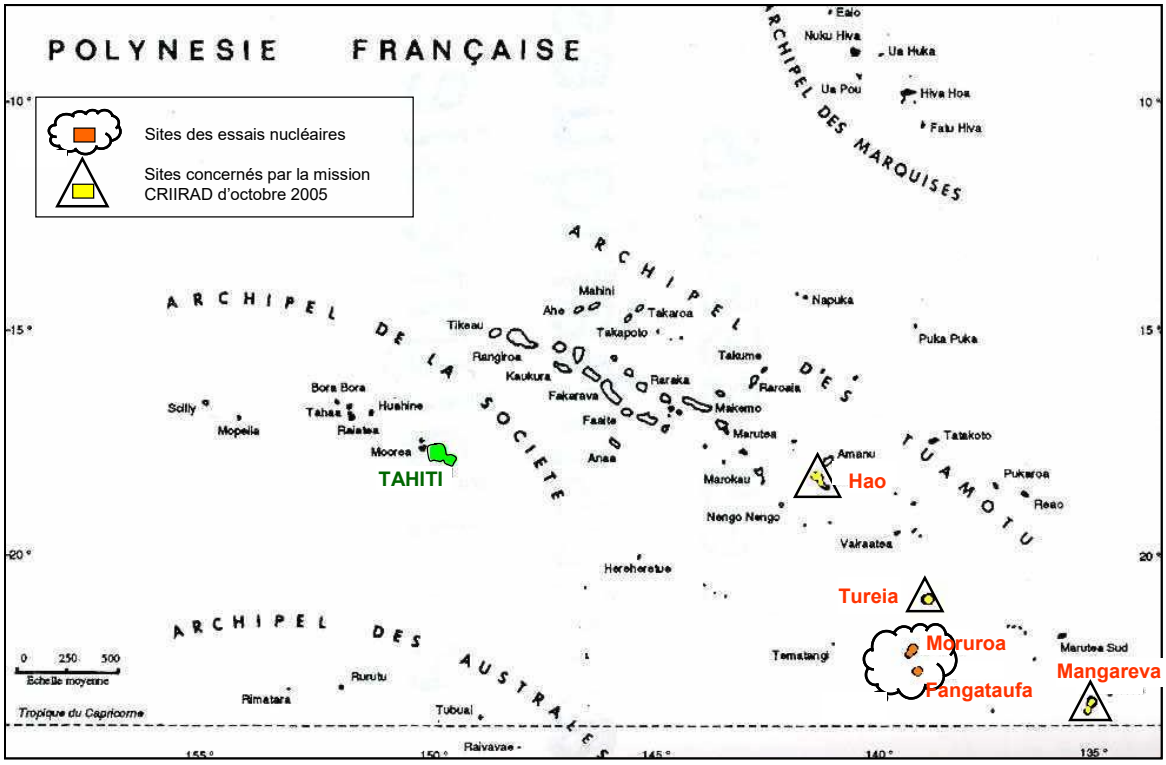
D'après le ministère de la Défense, **des retombées radioactives** ont atteint l'archipel des **Gambier** à **23 reprises durant cette période**. Ceci n'exclut pas d'autres phases de retombées d'ampleur plus réduite, ni les retombées des essais effectués par les autres puissances nucléaires.

La mission effectuée par la CRIIRAD aux Gambier en juillet 2012 vient compléter la campagne de prélèvements effectuée en **2005** pour la Commission d'Enquête sur les Conséquences des Essais Nucléaires Aériens.

Dans le cadre de l'étude de 2005, la CRIIRAD avait effectué des échantillonnages sur le milieu terrestre au niveau de 3 îles qui figurent sur la carte C1 ci-dessous (Hao, Tureia, Gambier).

A cette époque, seul le milieu terrestre avait pu être exploré par la CRIIRAD. L'étude avait permis de déceler des traces de radioéléments artificiels. La topographie montagneuse et plusieurs décennies de précipitations sur les deux îles investiguées de l'archipel des Gambier (Mangareva et Taravai) a probablement favorisé le lessivage des sols et entraîné le transfert des retombées radioactives intervenues à terre vers le lagon.

Carte C1 : localisation des principales îles ou atolls faisant l'objet de la mission CRIIRAD de 2005



1.1 Objectifs et déroulement de l'étude

En **2012**, la Délégation pour le Suivi des Conséquences des Essais Nucléaires (DSCEN), représentée par le ministre de l'environnement, de l'énergie et des mines, Mr Jacky BRYANT, a demandé au laboratoire de la CRIIRAD de conduire une expertise radiologique sur les **coraux du lagon des Gambier** (convention N°3095 / MEM / DSCEN du 20 juin 2012).

Le présent travail constitue une étude pilote dont les conclusions pourront permettre, le cas échéant, de réaliser une étude plus fine.

La DSCEN, a souhaité concentrer les efforts sur l'étude des coraux du lagon de l'île de **Mangareva** (archipel des Gambier) située à environ **500 km à l'est / sud-est de Moruroa**. Elle a été exposée, d'après les documents officiels, à des retombées radioactives importantes, **en particulier en 1966 et 1971** (cf. revue Damoclès N° 112-114 et rapport CRIIRAD de 2006).

L'île de Mangareva a une superficie de 14 km2. Elle culmine au Mont Duff (441 m).

Elle est divisée en 6 districts (Rikitea, Kirimiro, Gatavake, Atituiti, Akaputu et Taku).

Rikitea est le principal village de Mangareva et le chef lieu de la commune des Gambier.

Le travail effectué par le laboratoire de la CRIIRAD a consisté à :

1. Effectuer une recherche bibliographique préalable de manière à affiner la méthodologie (choix de l'espèce de corail à échantillonner et des radionucléides à rechercher).
2. Réaliser l'échantillonnage des coraux en 2 stations dans le lagon de Mangareva aux Gambier.
3. Remettre ces échantillons au CRIOBE[1] de Moorea pour réalisation de coupes et datation, et définir les pas de coupe en coordination avec lui.
4. Effectuer les formalités spécifiques auprès de la CITES (Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction), pour obtention des autorisations de prélèvement et de transport des échantillons, s'agissant d'espèces protégées.
5. Réceptionner les échantillons (strates datées) en son laboratoire à Valence (France).
6. Trier, nettoyer, broyer et homogénéiser les échantillons.
7. Procéder aux analyses radiologiques par spectrométrie gamma sur les 28 échantillons disponibles.
8. Sélectionner des laboratoires sous-traitants afin de réaliser des dosages spécifiques sur des radionucléides qui ne sont pas détectables directement par spectrométrie gamma (tritium, carbone 14, strontium 90, certains isotopes de l'uranium et du plutonium).
9. Adresser à ces laboratoires les échantillons à analyser et en assurer le suivi.
10. Procéder à un premier niveau d'interprétation des résultats.

1.2 Remerciements

L'équipe CRIIRAD tient à témoigner ici de l'accueil chaleureux réservé par les associations, les élus locaux, les anciens travailleurs et la population sur tous les sites visités. Elle a été frappée par les attentes fortes manifestées sur place pour que des informations scientifiques indépendantes soient données sur la situation radiologique actuelle et sur l'impact des essais passés. La disponibilité et l'efficacité des polynésiens a grandement facilité la mission.

[1] Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement de Polynésie Française.

La CRIIRAD remercie tout particulièrement :

- Monsieur Jacky Bryant, ministre de l'Environnement et initiateur de l'étude, qui a aussi participé aux activités sur le terrain.
- Madame Monique Richeton, tavana (maire) de Rikitea, pour le prêt d'une barge.
- Les employés communaux de Rikitea pour leur aide.
- Monsieur Bruno Barrillot, représentant de la DSCEN, cheville ouvrière du projet.
- Monsieur Michel Arakino qui a réalisé les plongées, les opérations de remontée des coraux et participé à la taille des blocs à Mangareva.
- Mme Heiava Lenoir, assistante de la mission, qui a pris en charge la logistique.
- Monsieur John Taroanui Doom, coordinateur de la mission.
- Messieurs Serge Planes et Yannick Chancerelle, Mme Pauline Bosserelle du CRIOBE, pour leurs conseils techniques et la réalisation de la datation des coraux.
- Les habitants de Rikitea pour leur aide matérielle gracieuse et leur accueil, et tout particulièrement monsieur Benoit Urarii et les membres de sa famille sans qui cette mission, aurait été infiniment plus compliquée à remplir compte tenu de l'absence du carottier.
- Le professeur Marcus Christl de l'ETH à Zurich pour la réalisation des dosages fins (U236, rapports isotopiques sur les isotopes 239 et 240 du plutonium, etc.) et les discussions sur leur interprétation.

2 Choix des coraux à échantillonner

Pour mener à bien cette étude, nous devions trouver une espèce de corail à vie longue, capable d'avoir conservé, par absorption, certains éléments radioactifs présents dans les retombées atmosphériques des essais aériens.

Nos recherches ont été faites en collaboration avec le CRIOBE de Moorea pour la détermination de l'espèce et avec un plongeur professionnel du service des phares et balises pour nous assurer de la présence de cette même espèce dans le lagon des Gambier.

Les colonies de coraux ***Porites lutea*** se sont avérées compatibles avec notre cahier des charges.

Ce corail fait partie, dans l'ordre des Scléractiniaires, de la famille des Poritidés. C'est un corail massif (cf. photographie ci-dessous) qui peut vivre plusieurs siècles et croit à une vitesse moyenne d'environ **10 mm/an**.

Du fait de la présence de bandes de croissance (sclérobandes) à périodicité annuelle, il est possible de déterminer l'âge du corail avec une chronologie précise. Ces bandes ou cernes sont comparables aux stries de croissance des arbres.

Echantillon de Porites extrait du lagon des Gambier



Une étude bibliographique sur la contamination des coraux par des éléments radioactifs liés aux retombées des essais nucléaires en Polynésie a été conduite par la CRIIRAD fin 2011 et début 2012, sans résultats probants pour les contaminations à long terme.

Le squelette des Porites est composé de **carbonate de calcium (CaCO3).**

On peut donc s'attendre à détecter une contamination par le **strontium 90** et le **carbone 14**.

Le strontium 90 est l'un des principaux radionucléides à vie longue présent dans les retombées des essais nucléaires aériens. Sa période[2] ou demi vie radioactive est de 28,5 ans. Il a une structure chimique proche du calcium et peut se substituer au calcium naturel au cours de l'édification du squelette du corail.

Le carbone 14 est un radionucléide naturel, mais il est présent également dans les retombées des essais nucléaires. Sa période physique est de 5 730 ans.

D'autres radionucléides présents dans les retombées peuvent également être piégés par ce type de corail (**césium 137, isotopes de l'uranium, isotopes du plutonium, tritium**, etc…).

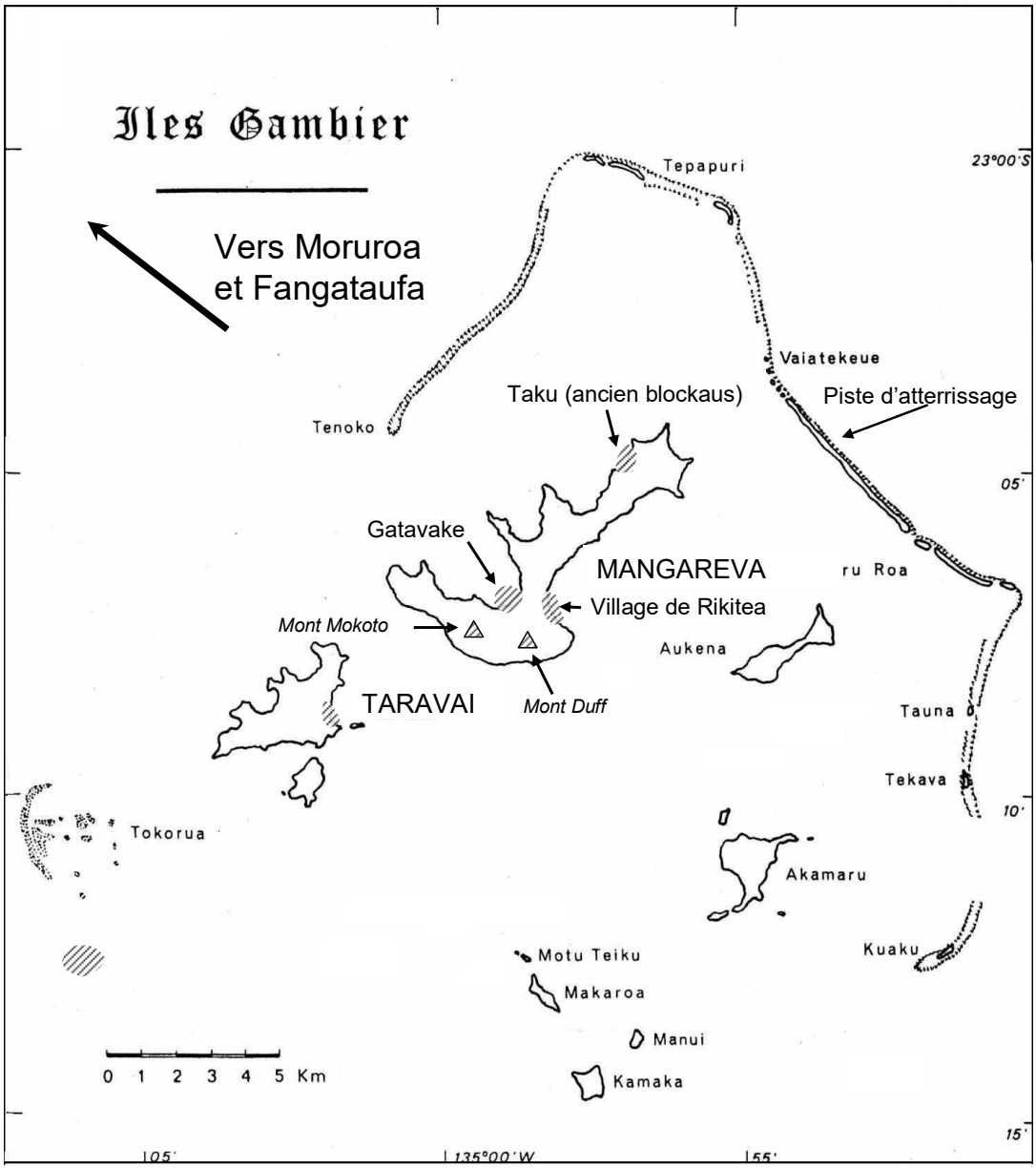
[2] La période physique d'un radionucléide est le temps au bout duquel la moitié des atomes radioactifs se sont désintégrés.

Les Porites se présentent le plus souvent sous forme sphérique plus ou moins régulière, suivant leurs implantations dans le milieu marin. Ils sont communément appelés « patates » de ce fait là et peuvent atteindre plusieurs mètres de diamètre suivant leur âge. Ils se fixent généralement sur la roche ou sur d'autres coraux et leur croissance est demi concentrique à partir de la base. La partie d'accroissement maximale est généralement au centre de la patate, dans la verticalité.

Pour cette étude, il nous fallait des spécimens ayant **au moins 70 ans d'âge** afin de disposer d'échantillons de référence datant d'avant les premiers essais nucléaires aériens dont les retombées atmosphériques auraient pu atteindre la Polynésie Française. En particulier les essais américains qui ont débuté en **1946** sur l'atoll de Bikini dans les îles Marshall. Ces essais aériens américains ainsi que les essais anglais se sont déroulés **jusqu'en 1962** dans l'océan Pacifique.

Nous avons décidé de travailler sur 2 spécimens si possible implantés dans des endroits où les situations de courants marins et éoliens sont différentes à l'intérieur du lagon des Gambier.

Carte C2 : Carte des Gambier (Mangareva)



3 Déroulement de la mission aux Gambier.

Un compte rendu de la mission, effectuée du **3 au 10 juillet 2012**, a été rédigé par monsieur Christian COURBON, technicien au laboratoire de la CRIIRAD, qui a coordonné les opérations sur le terrain. Ce compte rendu est reproduit ci-après.

« *Deux méthodes de prélèvement ont été envisagées :*

- *La première par carottage sous eau au moyen d'un carottier pneumatique portable alimenté par une bouteille de plongée, ce qui évite la destruction de la colonie,*
- *La deuxième par extraction de la colonie du fond, transport et découpe à terre.*

Nous avions choisi la première méthode car, compte tenu de son côté non destructif, très important dans notre démarche, elle ne demandait pas de gros moyens logistiques. Un carottier de ce type prêté par un laboratoire spécialisé avait été expédié de France mi-juin 2012.

A notre arrivée à Papeete début juillet le carottier n'était toujours pas arrivé. Nous l'avons attendu en vain jusqu'au départ pour les Gambier le 3 juillet. Il finira par arriver début août.

Nous n'avions pas vraiment prévu ce contre-temps et nous avons dû passer à la deuxième méthode avec une grosse dose d'improvisation et les moyens du bord.

*La difficulté majeure de cette méthode est le poids des Porites qui oscille - pour 70 à 80 ans d'âge - entre **800 kg et 1 tonne pièce**. Il nous fallait donc trouver sur place un moyen de levage et une embarcation capable d'effectuer cette opération délicate, sans compter le décrochage des Porites de leurs socles.*

***Mardi 3 juillet**, la journée est consacrée au transfert Papeete/Rikitea, à l'installation de l'équipe et aux premiers contacts avec les participants locaux pour la logistique sur place.*

Par chance, nous avons croisé à l'aéroport de Mangareva la Tavana de Rikitea, Mme Monique Richeton, qui s'apprêtait à embarquer pour Papeete.

Nous l'avons sollicitée pour avoir l'aide de la commune des Gambier notamment le prêt de la barge technique, ce qu'elle a accepté. Nous avons la barge, il nous manque le moyen de relevage tout aussi essentiel.

Nous demandons au responsable des services techniques de la commune s'il serait possible de nous prêter le tractopelle de la commune mais celui-ci est actuellement utilisé pour des travaux d'extension de lignes électriques, donc pas disponible.

Avec l'aide de Benoit Urarii, notre pilote et propriétaire du bateau que nous avions loué, nous avons dû faire du porte à porte pour trouver une solution de rechange. C'est finalement un de ses cousins qui va accepter de se mettre gracieusement à notre disposition avec sa mini pelle mécanique.

***Mercredi 4 juillet**, début des reconnaissances pour localiser les 2 Porites correspondants à l'âge que nous avons défini.*

Nous partons du port de Rikitea en direction du Nord du motu de Totegegie, le temps est couvert avec un léger vent qui provoque des irisations en surface ce qui ne facilite pas la visibilité du fond et nous ralentit en nous obligeant à se servir du bathyscope. Nous longeons, par l'intérieur, la barrière de corail jusqu'au motu Tenoko à l'entrée de la passe ouest sans succès.

Pour le retour, nous longeons l'ouest de l'île de Mangareva, de la baie de Gatavake jusqu'à la baie de Taku. Cette partie est très encombrée par les parcs à huîtres perlières et il n'y a pas de Porites en vue.

C'est à la pointe Tepaeture côté baie d'Akaputu, à l'extrême Nord de l'île de Mangareva, que nous trouvons le premier spécimen avec la bonne taille et qui n'est pas encroûté avec d'autres coraux.

L'après midi, nous explorerons les abords de l'île d'Aukena, contournerons par le sud l'île d'Akamaru pour finir à la pointe Teruatonu au sud de l'île de Mangareva.

Un Porites de la taille que nous recherchons est repéré dans ce secteur mais la houle et le courant en profondeur empêchent le plongeur de prendre ses mensurations pour déterminer son âge. Pour des raisons de sécurité évidentes nous abandonnons ce point de prélèvement potentiel.

Carte C3 / Localisation des 2 échantillons de Porites A et B à Mangareva



***Jeudi 5 juillet**, poursuite des reconnaissances à proximité de **l'île de Taravai**, dans la zone qui va du village jusqu'à la pointe Toapuakotuku.*

Plusieurs spécimens sont repérés dont certains présentent un aplatissement sur le haut ce qui est un signe caractéristique du fait qu'ils ne sont pas immergés en permanence suivant les marées, donc pas exploitables pour notre étude.

Nous ne nous attarderons pas dans cette zone. En effet, le seul spécimen exploitable est de taille supérieure à celle recherchée, ce qui va poser un problème pour l'extraire. De plus, la distance - près de 10 km du port de Rikitea - est trop importante compte tenu de la faible vitesse d'avancement de la barge de la commune des Gambier et du temps qu'il nous reste.

*Sur le retour vers Rikitea, nous explorons minutieusement la zone entre la pointe Teruatonu où nous avions repéré un Porites la veille et le port de **Rikitea.***

*Nous trouvons enfin notre deuxième spécimen exploitable juste **devant le vivier du Roi,** à une quarantaine de mètres au large de son enceinte. Nous avons donc notre second spécimen (point A sur la carte C3 ci-dessus) et décidons de le décrocher de son socle immédiatement. Le plongeur se met à l'eau pour prendre ses mensurations précises afin de vérifier son âge et dégager sa base du sable afin de se rendre compte de l'importance de son emprise sur son support.*

Nous ceinturons à l'aide d'un bout la base du Porites et en conjuguant la force de traction du bateau auquel nous avons amarré le bout et l'effet de levier effectué par le plongeur avec une barre à mine, il se désolidarise de son support après plusieurs tentatives.

Ensuite le plongeur, toujours à l'aide de la barre à mine, fait rouler le Porites sur un filet robuste posé au préalable sur le fond. Une fois le Porites emprisonné dans le filet, il est prêt pour le relevage que nous effectuerons le lendemain avec la barge de la commune, mise à notre disposition ce jour là.

C'est la fin de matinée et l'idée de perdre une demi-journée à attendre - avec le peu de temps qui nous est imparti pour cette mission - va nous décider à essayer d'extraire le premier Porites par nos propres moyens, sans la barge.

Benoit Urarii, qui est aussi perliculteur, a l'idée d'utiliser des bouées qui servent à maintenir les essaims d'huîtres et il en possède une grande quantité. Une bouée peut assurer la flottaison de 25 à 30 kg, donc avec un certain nombre de bouées accrochées au filet, nous pourrions décoller le Porites du fond, le maintenir en subsurface et le tracter jusqu'au port tout proche. Après la théorie, la pratique.

*Nous embarquons une **trentaine de bouées**, récupérons au passage un plongeur supplémentaire dans la ferme perlière de Benoit et cap sur le vivier du Roi. La principale difficulté de cette opération a été l'immersion des bouées pour les accrocher au plus près du filet.*

Une fois le maximum de bouées fixées nous avons pu soulever l'échantillon à l'aide d'une poulie fixée au bateau et le tracter avec moult précaution, car pour contourner le quai nous avons dû traverser une zone à plus de 15 mètres de profondeur.

Le premier Porites est finalement hissé, non sans mal, à sec sur le quai en fin de journée.

***Vendredi 6 juillet**, nous avons la barge pour effectuer le deuxième prélèvement au nord de l'île de Mangareva, à près de 7 km du quai de départ.*

La première opération délicate de la journée - ce ne sera pas la seule - est le chargement de la mini pelle mécanique sur celle-ci.

Une fois la mini pelle chargée et solidement amarrée, une bonne heure de navigation nous attend pour rejoindre la zone de prélèvement.

Nous mettons en œuvre la même technique d'extraction que celle employée la veille pour le premier Porites, en vain. La base de celui-ci est fixée sur un autre spécimen, ce que nous ne pouvions pas voir, lors de sa localisation, à cause du sable qui l'entourait.

Malgré les efforts conjugués de la mini pelle et des 2 puissants moteurs de la barge, il nous est impossible de le décrocher de son socle.

Rapidement nous devons en trouver un autre, similaire en âge, dans le même secteur. C'est à 1 km plus au sud, dans la baie d'Akaputu, que nous le localiserons (localisation B sur la carte C3 page précédente).

Il se trouve sous environ 4 m d'eau au bord d'une pente. Lors de la traction pour le désolidariser de son socle, une fois sectionné, il roule jusqu'à 13 m de profondeur. Il va nous falloir plusieurs heures d'efforts intenses et toute la dextérité du pilote de la barge et du conducteur de la mini pelle pour le remonter, le ramener sur le rivage, et pouvoir le hisser sur la barge. Cette opération nous prendra la journée entière avant de pouvoir le déposer enfin sur le quai de la légion, notre point de départ.

***Samedi 7 juillet**, nous sommes prêts pour la **découpe** de nos 2 Porites, ce qui ne va pas être une mince affaire au propre comme au figuré.*

*Chaque individu mesure entre **90 cm et 1 m de hauteur** pour une circonférence comprise entre **2,3 m et 2,5 m**. Leur poids avoisine la tonne du fait qu'ils sont gorgés d'eau.*

*La partie de ces coraux qui nous intéresse - c'est-à-dire la zone d'accroissement maximale - est située au centre des patates verticalement. Il nous faut réaliser des **carottes carrées de 20 cm de côté** pour la première découpe grossière dans chacun des individus.*

Avec le peu de matériel dont nous disposons, la tâche va être longue et fastidieuse, comparable à tailler un cure-dents dans le cœur d'un arbre avec un simple canif.

Au départ de l'opération, nous ne disposons que de marteaux et burins ainsi que d'une disqueuse. Nous avions amené de France une scie à pierre électrique (au cas où) qui nous sera fort utile dans la finition des carottes. Mais auparavant, il nous faut atteindre le centre des coraux en destructif.

Rapidement, les habitants qui nous observent vont nous amener du matériel supplémentaire : marteau piqueur, perforateur burineur et une autre disqueuse. A peine débarqué de l'avion, en début d'après-midi, le ministre de l'Environnement Jacky Bryant se joindra à nous dans cette entreprise.

L'opération de découpe des 2 Porites se poursuivra jusque tard le dimanche soir, juste entrecoupée par l'inévitable messe dominicale, dans la magnifique cathédrale Saint Michel restaurée récemment.

Découpe d'un échantillon de Porites extrait du lagon des Gambier



***Lundi 9 juillet**, nous procédons à l'affinage du profil des carottes au moyen de la scie à pierre électrique et à leur conditionnement pour le retour à Papeete.*

***Mardi 10 juillet**, transfert Rikitea/Papeete. Fin de la mission CRIIRAD aux Gambier.*

*De retour à Papeete, les deux carottes ont été livrées par le technicien CRIIRAD au CRIOBE à Moorea le **12 juillet 2012**. »*

4 Prétraitement et datation des échantillons

Datation et découpe des strates

Le CRIOBE a procédé à l'extraction de lames fines qui ont été radiographiées afin d'identifier les stries de croissance annuelle et de procéder à la datation puis à la découpe des strates. Son rapport est reproduit en Annexe 4.

Une fois la datation effectuée, la CRIIRAD a déterminé le pas d'échantillonnage (5 ans) et les dates idéales de début et fin de strate, en fonction de la date des tirs des essais nucléaires en Polynésie française (cf. Annexe 5) et des quantités de matière nécessaires pour les diverses séries d'analyse en laboratoire.

Ce pas est finalement compris entre **3 et 7 ans**, en fonction des discontinuités physiques rencontrées :

- Demi-coupes. En effet, pour faciliter le transport de Mangareva à Tahiti, les carottes brutes ont dû être coupées en deux,
- Difficulté de lectures liées à **la bio-érosion** par les « dattes de mer » (*Lithophaga nigra)*, qui ont créé de nombreuses perforations dans le corail.

Dans la mesure du possible, le CRIOBE a fait en sorte que les années pour lesquelles la traçabilité des tirs nucléaires est recherchée, ne correspondent pas aux limites de coupe.

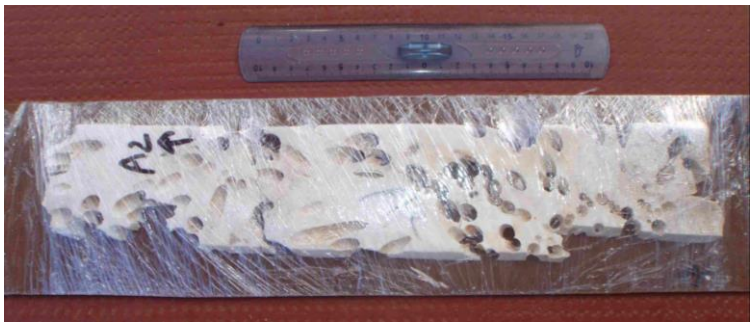
Le CRIOBE a indiqué que la précision de datation est évaluée à **5 ans**.

Cette valeur n'est pas calculée statistiquement car le CRIOBE n'a pas travaillé sur plus de 2 coupes par colonie. La raison pour laquelle la précision n'est pas meilleure est principalement liée à la qualité des colonies. La bioérosion est très importante dans les coupes disponibles et la datation se fait sur la reconnaissance de portions de stries souvent très courtes, car interrompues par les perforations (voir ci-dessous une photo d'une des coupes fines utilisée où l'on voit les perforations). La correspondance avec les stries adjacentes (antérieure ou postérieure) n'est pas toujours claire sur les radiographies et la caractérisation d'une strie sur une faible portion de largeur de coupe est difficile.

De ce fait les strates de 5 ans utilisées risquent d'intégrer des années supérieures ou antérieures, c'est pourquoi, dans la suite du rapport, nous appellerons « période des essais nucléaires atmosphériques en Polynésie française élargie », la période correspondant à 4 strates :

- 1956 à 1981 pour la colonie A,
- 1961 à 1981 pour la colonie B

Exemples de bio-érosion (perforations) sur les Porites extraits du lagon des Gambier



Ce travail terminé, les échantillons ont été expédiés au laboratoire de la CRIIRAD pour analyses.

Il est à noter que l'expédition des échantillons a nécessité de lourdes formalités administratives du fait de la nécessité d'obtention d'un permis CITES (le corail est en effet une espèce protégée).

Le tableau d'inventaire des strates avec leur date de début et fin estimée par le CRIOBE est reproduit ci-dessous :

Tableau 1 : Liste des strates découpées par le CRIOBE

La mention "Demi coupe " indique la discontinuité physique des échantillons qui pour chacune des 2 colonies ont été coupés en 2 parties pour les besoins de la première partie du transport (Gambier – Papeete).
La datation à jonction des demi-coupes est notée avec un saut d'incertitude d'une année.

	Colonie A	Colonie B
Date de prélèvement	5 juillet 2012	5 juillet 2012
Position géographique (dedrés.centième de degrés)	23.122° S 134.966° W	23.081° S 134.931° W
Longueur des échantillons (cm)	81,5	88
Age estimé de la colonie / Date de recrutement (an / année civile AD)	80 / 1932	76 /1936
Vitesse moyenne de croissance (cm/an)	1,0187	1,1578
Nombre de tranches	14	14
Périodes des tranches	1932 - 1941 1941 - 1946 1946 – 1951 1951- 1956 1956 – 1964 1964 – 1971 (72) Demi coupe 1972 (71) – 1976 1976 – 1981 1981 – 1986 1986 – 1991 1991 – 1996 1996 – 2001 2001 – 2006 2006 - 2012	1936 – 1948 1948 -1951 1951 -1956 1956 -1961 1961 – 1964 1964 -1969 (70) Demi coupe 1970 (69)-1976 1976 – 1981 1981 – 1986 1986 – 1991 1991 – 1996 1996 – 2001 2001 – 2006 2006 - 2012

Traitement des strates découpées

A réception au laboratoire de la CRIIRAD, début novembre 2012, les échantillons ont été numérotés et leur niveau d'émission de radiation a été contrôlé au moyen d'un scintillomètre gamma SPP2 (tous les résultats se sont avérés comparables au bruit de fond de la salle de préparation soit 40 coups par seconde). Ils ont ensuite subi une dessication en étuve, ont été nettoyés (élimination des dattes de mer), pesés, broyés, homogénéisés et différentes fractions aliquotes ont été constituées (pesées et numérotées) pour les différentes analyses.

La liste des strates est reproduite dans le tableau 2 page suivante.

Tableau 2 : Liste des strates réceptionnées et traitées à la CRIIRAD

N° strate corail (labo CRIIRAD)	Nature	Année (détermination CRIOBE)	Poids total de la carotte nettoyée (CRIIRAD)	Condit *	Masse (g) f < 2 mm	N° d'analyse (CRIIRAD)	RESTE R1 Masse (g) f < 2 mm	RESTE Masse (g) f > 2 mm	Radiamètre (flux gamma SPP2 c/s)
141112A1	Porites A	2006-2012	**708,72**	M209	618,69	C27065	85,28	4,75	40
141112A2	Porites A	2001-2006	**694,00**	M89	671,71	C27033	16,56	5,73	40
141112A3	Porites A	1996-2001	**413,61**	B250	314,52	C27035	93,81	5,28	40
141112A4	Porites A	1991-1996	**982,97**	M117	628,92	C27053	343,62	10,43	40
141112A5	Porites A	1986-1991	**1240,79**	M86	684,87	C27056	551,73	4,19	40
141112A6	Porites A	1981-1986	**701,79**	M88	625,83	C27058	71,24	4,72	40
141112A7	Porites A	1976-1981	**773,35**	M90	642,04	C27031	125,87	5,44	40
141112A8	Porites A	1972(71)-1976	**1246,08**	M67	654,51	C26989	586,39	5,18	40
141112A9	Porites A	1964-1971(72)	**418,11**	B250	307,49	C26997	107,30	3,32	40
141112A10	Porites A	1956-1964	**532,77**	B250	298,18	C27027	228,15	6,44	40
141112A11	Porites A	1951-1956	**592,22**	M141	539,49	C27015	47,52	5,21	40
141112A12	Porites A	1946-1951	**382,26**	B250	315,34	C27052	61,88	5,04	40
141112A13	Porites A	1941-1946	**420,74**	B250	305,21	C27024	112,23	3,30	40
141112A14	Porites A	1932-1941	**1910,06**	M252	663,73	C27018	1241,51	4,82	40
141112B1	Porites B	2006-2012	**803,15**	M196	671,69	C27068	126,63	4,83	40
141112B2	Porites B	2001-2006	**778,85**	M75	706,20	C27087	67,61	5,04	40
141112B3	Porites B	1996-2001	**851,69**	M70	677,27	C27082	170,54	3,88	40
141112B4	Porites B	1991-1996	**931,46**	M34	687,00	C27089	239,66	4,80	40
141112B5	Porites B	1986-1991	**696,30**	M225	663,83	C27091	27,47	5,00	40
141112B6	Porites B	1981-1986	**823,35**	M73	672,84	C27047	146,58	3,93	40
141112B7	Porites B	1976-1981	**787,35**	M116	668,44	C27029	115,09	3,82	40
141112B8	Porites B	1970(69)-1976	**1332,56**	M172	668,82	C27010	657,12	6,62	40
141112B9	Porites B	1964-1969(70)	**733,64**	M69	602,65	C27013	126,81	4,18	40
141112B10	Porites B	1961-1964	**387,17**	B250	328,73	C27025	51,60	6,84	40
141112B11	Porites B	1956-1961	**648,32**	M148	642,27	C27044	0,00	6,05	40
141112B12	Porites B	1951-1956	**771,56**	M193	652,14	C27074	114,92	4,50	40
141112B13	Porites B	1948-1951	**740,64**	M151	633,23	C27070	100,23	7,18	40
141112B14	Porites B	1936-1948	**948,28**	M161	653,25	C27060	288,73	6,30	40

Note : la strate 1948-1951 de la colonie B contenait des sédiments

5 Choix des méthodes analytiques

5.1 Radionucléides à rechercher en priorité

Nous avons reporté en Annexe 1, des notions de base sur la radioactivité et les types de radionucléides susceptibles d'être présents lors de l'explosion d'armes nucléaires. La réalisation des essais nucléaires a conduit à disperser en effet dans l'environnement des radionucléides de nature très différente.

Quarante à cinquante ans après les retombées, les radionucléides de courte période ont totalement disparu. C'est le cas par exemple de l'iode 131, de période physique égale à 8 jours, puisqu'au bout d'une seule année sa radioactivité est divisée par 50 millions de millions.

Nous avons reporté dans le tableau 3 ci-dessous, le facteur de décroissance au bout de 1, 10, 30 et 40 ans pour les radionucléides principaux potentiellement associés aux retombées.

Pour un radionucléide comme le ruthénium 106, de période égale à 1 an, le facteur de décroissance est supérieur à 800 au bout de 10 ans et à 700 millions au bout de 30 ans.

Trente ans après les retombées, les radionucléides de période inférieure à 5 ans, ont un facteur de décroissance supérieur à 50.

Tableau 3 : Facteurs de décroissance pour quelques radionucléides

Radionucléide	Période (année)	Facteur de décroissance en 1 an	Facteur de décroissance en 10 ans	Facteur de décroissance en 30 ans	Facteur de décroissance en 40 ans
Iode 131	0,02	5,54E+13	2,75E+137	-	-
Zirconium 95	0,18	52,24	1,51E+17	3,46E+51	5,24E+68
Cérium 144	0,78	2,43	7 233	3,78E+11	2,74E+15
Manganèse 54	0,85	2,25	3 343	3,73E+10	1,25E+14
Ruthenium 106 / Rhodium 106	1,02	1,97	894	7,14E+08	6,38E+11
Césium 134	2	1,41	32	32 768	1,05E+06
Prométheum 147	2,62	1,30	14	2 798	39 435
Antimoine 125	2,73	1,29	13	2 032	25 745
Europium 155	4,96	1,15	4	66	268
Cobalt 60	5,27	1,14	4	52	193
Tritium ^{3}H	12,33	1,06	2	5	9
Europium 152	13,3	1,05	2	5	8
Plutonium 241	14,4	1,05	2	4	7
Strontium 90	28,5	1,02	1,3	2	3
Césium 137	30	1,02	1,3	2	3
Bismuth 207	32,2	1,02	1,2	2	2
Plutonium 238	87,7	1,01	1,1	1,3	1,4

A partir de la liste des radionucléides contenus dans les tableaux en Annexe 1, nous avons élaboré, à titre indicatif, une liste de **ceux dont la période est supérieure à 280 jours**.

Cette nouvelle liste est reproduite dans le tableau 4, page suivante.

Tableau 4 : Liste de radionucléides potentiellement présents lors des retombées atmosphériques et de période supérieure à 280 jours

Radionucléide	Origine principale	Période (a)	Emission X ou gamma (a)	Mode de désintégration (a)
Période inférieure à 5 ans				
Cérium 144	PF	284,9 jours	oui > 19 %	bêta
Manganèse 54	PA, Fe 54 stable	312,2 jours	oui > 100 %	bêta
Ruthenium 106 / Rhodium 106	PF	1,02 an (Eq 29,8 sec.)	oui > 30 %	bêta
Césium 134	PA, Cs 133 (stable)	2 ans (et 2,9 h)	oui > 100 %	bêta
Prométheum 147	PF	2,62 ans	très faible	bêta
Antimoine 125	PF	2,73 ans	oui > 100 %	bêta
Fer 55	PA, Fe 54 stable	2,73 ans	oui > 26 % (< 7 keV)	Capt. Elec.
Rhodium 102m	PA	2,9 ans	oui > 100 %	bêta
Rhodium 101	PA	3,3 ans	oui > 100 %	bêta
Europium 155	PF	4,96 ans	oui > 80 %	bêta
Cobalt 60	PA, Co 59 stable	5,27 ans (et 10,47 min.)	oui > 100 %	bêta
Période comprise entre 5 et 15 ans				
Krypton 85	PF	10,72 ans (et 4,48 h)	oui < 1 %	bêta
Tritium ^{3}H	Matière Nuc ++, PA (Li6, etc..)	12,33 ans	non	bêta
Europium 152	PA, Eu 151 stable	13,3 ans (et 9,32 h)	oui > 100 %	bêta (28 %)
Plutonium 241	Matière Nuc., capture U 238 et Pu 239	14,4 ans	très faible	bêta
Période comprise entre 15 et 40 ans				
Strontium 90	PF	28,5 ans	non	bêta
Yttrium 90	fils Sr 90	2,67 j	très faible	bêta
Césium 137	PF	30 ans	oui > 85 %	bêta
Bismuth 207	PA	32,2 ans	oui > 100 %	Capt. Elec.
Période supérieure à 40 ans				
Plutonium 238	Matière Nuc., fils Np 238 et Cm 242	87,7 ans	très faible , X 10 %	alpha
Samarium 151	PF	90 ans	très faible	bêta
Américium 241	Fils Pu 241	432,7 ans	oui > 75 %	alpha
Carbone 14	PA, N14 stable	5 730 ans	non	bêta
Plutonium 240	Matière Nuc., capture U 238, Pu 239-n	6 563 ans	très faible	alpha
Plutonium 239	Matière Nuc., fils Np 239	24 110 ans	très faible	alpha
Sélénium 79	PF	< 65 000 a	non	bêta
Technétium 99	PF, fils Mo 99	213 000 ans	très faible	bêta
Uranium 234	Associé à U235 et 238	245 000 ans	très faible	alpha
Zirconium 93	PF	1,53 million d'A	oui > 10 %, < 31 keV	bêta
Neptunium 237	Fils U 237 (et Am 241)	2,14 millions d'A	oui > 80 %	alpha
Césium 135	PF, fils Xe 135	3,0 millions d'A	non	bêta
Palladium 107	PF	6,5 millions d'années	non	bêta
Iode 129	PF	15,7 millions d'A	oui > 60 %	bêta
Uranium 235	Matériau fiisile	700 millions d'années	oui > 100 %	alpha
Uranium 238	Matériau fertile	4,47 milliards d'années	très faible	alpha
Thorium 234	Fils d'uranium 238	24,1 jours	oui > 100 %	bêta

Légende (a) Données issues de "Table of Radioactive Isotopes, Browne et Firestone, 1986".
PF : Produit de Fission PA : Produit d'Activation

Seuls certains radionucléides associés aux retombées de période physique suffisamment longue pourraient être encore détectés, en 2012, dans les coraux des Gambier. Parmi les radionucléides à rechercher en priorité, on peut citer en particulier :

- Des **produits de fission** comme le **strontium 90** (28,5 ans), **l'antimoine 125** (2,73 ans), le **césium 137** (période 30 ans), le samarium 151 (90 ans), **l'europium 155** (4,96 ans), l'iode 129 (15,7 millions d'années), etc…
- Des radionucléides **constitutifs de l'engin nucléaire** :
    - Isotopes de l'uranium comme **l'uranium 235, l'uranium 234 et l'uranium 238**,
    - Isotopes du **plutonium**. Il s'agit d'isotopes émetteurs alpha (plutonium 238, 239 et 240) et émetteurs bêta (plutonium 241).
    - Autres transuraniens, et en particulier **l'américium 241** (432,7 ans), créé par désintégration du plutonium 241,
    - **Tritium** (période 12,3 ans)
- Des **produits d'activation** comme le **carbone 14** (5 730 ans), le **cobalt 60** (5,27 ans), **l'europium 152** (13,3 ans), le bismuth 207 (32,2 ans), etc.…

Cette liste est confortée par les résultats des analyses officielles publiées par la DIRCEN[3] et portant sur les sols et sédiments de Moruroa et Fangataufa.

Dans son rapport de 1998, la DIRCEN note par exemple que la radioactivité artificielle des sédiments de Moruroa est due, par ordre décroissant d'activité, aux radionucléides suivants : plutonium 239-240, plutonium 238, europium 155, américium 241, cobalt 60, strontium 90, césium 137 et antimoine 125.

A noter que ces études ne font pas état du dosage des isotopes de l'uranium, ni du carbone 14.

5.2 Analyses par spectrométrie gamma

Le choix des techniques d'analyses dépend du type de radionucléide que l'on s'attend à rencontrer, du milieu dans lequel il est dosé (matière minérale, matière végétale, eau) et de la limite de détection que l'on souhaite atteindre.

L'ensemble des échantillons collectés ont fait l'objet d'analyses par spectrométrie gamma au laboratoire de la CRIIRAD.

En effet, la spectrométrie gamma est une méthode analytique relativement sensible, rapide à mettre en œuvre et d'un coût limité. Son atout principal est de permettre de détecter et de quantifier un grand nombre de radionucléides artificiels et naturels émetteurs gamma.

Dans le cas de la présente étude, les radionucléides émetteurs gamma artificiels sont ceux apparaissant en jaune dans le tableau 4 page précédente.

Les analyses par spectrométrie gamma effectuées par le laboratoire de la CRIIRAD permettent de doser :

- De nombreux produits de fission et d'activation à période longue (dont cobalt 60, **iode 129**, **césium 137**, etc…).
- **L'américium 241** (période physique 432,7 ans), émetteur de rayonnements alpha et gamma. Il est produit par la désintégration du plutonium 241 (période physique de 14,4 ans), dont la disparition progressive s'accompagne d'une augmentation de l'activité en américium 241.
- **L'uranium 235** (émetteur alpha et gamma) **et l'uranium 238** (à travers son premier descendant le thorium 234).

Les agréments du laboratoire de la CRIIRAD sont listés en Annexe 3.

[3] Geomechanical and Radiological impact of nuclear tests at Mururoa and Fangataufa (French Polynesia) / CEA-DAM et ministère de la Défense-DIRCEN / La Documentation Française 1998, Documents N°1 et 2.

Après broyage et homogénéisation, une fraction aliquote a été conditionnée en géométrie calibrée B250 ou Marinelli (500 cc) pour comptage longue durée (100 000 à 300 000 secondes) par spectrométrie gamma HpGe.

Les spectres gamma ont été dépouillés sur toute la gamme d'énergie de 20 keV à, 1,8 MeV. Tous les radionucléides émetteurs gamma artificiels détectés ont fait l'objet d'un calcul d'activité dont le résultat est publié.

Afin de ne pas alourdir inutilement les tableaux de résultats, les limites de détection ne sont pas publiées pour tous les radionucléides émetteurs gamma détectables, mais seulement pour une sélection de radionucléides « naturels » et artificiels (Cs137, I 129, Am 241).

Dans le cas où le radionucléide n'est pas détecté ou, plus exactement, où son activité est inférieure au seuil de détection, le résultat est exprimé sous la forme (<) ce qui signifie : « inférieur à la limite de détection ».

5.3 Autres techniques analytiques

Pour contrôler l'impact d'activités liées spécifiquement à des tirs d'armes nucléaires la réalisation d'une caractérisation radiologique approfondie impose de doser également certains radionucléides qui ne peuvent être mesurés par spectrométrie gamma.

Certains n'émettent en effet que des rayonnements alpha (**isotopes 238, 239 et 240 du plutonium, isotope 232, 234, 236 de l'uranium**) ou que des rayonnements bêta (**strontium 90, carbone 14, tritium, plutonium 241**). Ces radionucléides ne peuvent être détectés par spectrométrie gamma. Le dosage de tous ces radionucléides nécessite des quantités de matière importantes, une extraction chimique préalable et des comptages longs, ce qui entraîne des coûts importants.

Afin de limiter le budget, et compte tenu des contraintes de délais et de masse totale disponible, seule une fraction des échantillons les plus significatifs a pu faire l'objet de certaines de ces mesures, en fonction de l'intérêt particulier des échantillons.

Nous avons privilégié les 2 strates correspondant à la période des essais nucléaires atmosphériques français, ainsi que la strate plus ancienne et la strate plus récente soit 4 strates par spécimen. Ces 4 strates correspondent à la « **période des essais nucléaires élargie** ». Cela permet de tenir compte à la fois des imprécisions liées à la datation des strates et à leur découpe et à d'éventuels phénomènes de transfert des contaminants d'une strate à l'autre (diffusion, influence des dattes de mer, etc..)

En fonction des premiers résultats, l'étude pourrait être poursuivie, le cas échéant, sur les autres strates.

Compte tenu de la rapidité des échanges entre le spécimen vivant et son environnement l'activité du tritium libre renseigne sur la contamination du milieu dans les heures qui précèdent l'exposition. Il est donc plus intéressant de mesurer l'activité du **tritium organiquement lié** (OBT : Organically Bound Tritium), c'est-à-dire la fraction du tritium qui est métabolisée par le spécimen et fixée aux molécules constitutives de la matière organique. La mesure de ce paramètre présente un double intérêt :

- Obtenir une meilleure représentativité temporelle par l'effet intégrateur,
- Avoir une vision plus complète de l'impact sanitaire, la toxicité du tritium organiquement lié étant plus importante que celle du tritium libre.

Le dosage du tritium organiquement lié a été confié à un laboratoire spécialisé qui dispose des techniques d'extraction de la fraction organique. Il s'agit du laboratoire privé RCD (RadioCarbon Dating) situé à Oxon en Angleterre.

Le dosage du carbone 14 a également été confié à ce laboratoire.

Le dosage du strontium 90 et des isotopes émetteurs alpha du plutonium (plutonium 238, plutonium 239 et 240) et de l'uranium (232, 234, 235, 236, 238) a été confié au laboratoire SUBATECH.

Des mesures poussées par spectrométrie de masse couplée à un accélérateur (AMS) ont été confiées au laboratoire ETH à Zurich pour étude spécifique de l'uranium 236 et de certains ratios isotopiques concernant le plutonium.

6 Radionucléides artificiels émetteurs gamma

Les analyses par spectrométrie gamma avaient pour objet de rechercher un certain nombre de radionucléides artificiels émetteurs gamma comme le césium 137 ainsi que d'autres produits de fission et d'activation émetteurs gamma (comme cobalt 58, cobalt 60, manganèse 54, antimoine 125, cérium 144, argent 110^m, iode 129, ruthénium 106) et un transuranien émetteur gamma (américium 241).

Les principaux résultats d'analyse des radionucléides artificiels émetteurs gamma sont reportés dans le tableau 5 ci-dessous.

Les activités sont inférieures aux limites de détection pour tous les radionucléides artificiels émetteurs gamma recherchés dans les 28 échantillons de corail analysés.

Tableau 5 : Principaux résultats d'analyses par spectrométrie gamma sur les coraux de Mangareva (radionucléides artificiels)

N° strate corail (labo CRIIRAD)	Nature	Année (détermination CRIOBE)	Poids total de la carotte nettoyée (CRIIRAD)	N° d'analyse (CRIIRAD)	Cs 137 (Bq/kg)	Iode 129 (Bq/kg)	Am 241 (Bq/kg)
141112A1	Porites A	2006-2012	**708,72**	C27065	< 0,04	< 0,07	< 0,07
141112A2	Porites A	2001-2006	**694,00**	C27033	< 0,09	< 0,05	< 0,05
141112A3	Porites A	1996-2001	**413,61**	C27035	< 0,13	< 0,14	< 0,14
141112A4	Porites A	1991-1996	**982,97**	C27053	< 0,04	< 0,05	< 0,05
141112A5	Porites A	1986-1991	**1240,79**	C27056	< 0,03	< 0,05	< 0,05
141112A6	Porites A	1981-1986	**701,79**	C27058	< 0,03	< 0,05	< 0,04
141112A7	Porites A	1976-1981	**773,35**	C27031	< 0,03	< 0,05	< 0,04
141112A8	Porites A	1972(71)-1976	**1246,08**	C26989	< 0,05	< 0,04	< 0,04
141112A9	Porites A	1964-1971(72)	**418,11**	C26997	< 0,14	< 0,14	< 0,15
141112A10	Porites A	1956-1964	**532,77**	C27027	< 0,16	< 0,15	< 0,17
141112A11	Porites A	1951-1956	**592,22**	C27015	< 0,14	< 0,05	< 0,04
141112A12	Porites A	1946-1951	**382,26**	C27052	< 0,12	< 0,13	< 0,13
141112A13	Porites A	1941-1946	**420,74**	C27024	< 0,18	< 0,18	< 0,20
141112A14	Porites A	1932-1941	**1910,06**	C27018	< 0,04	< 0,05	< 0,05
141112B1	Porites B	2006-2012	**803,15**	C27068	< 0,03	< 0,05	< 0,05
141112B2	Porites B	2001-2006	**778,85**	C27087	< 0,03	< 0,05	< 0,05
141112B3	Porites B	1996-2001	**851,69**	C27082	< 0,03	< 0,05	< 0,05
141112B4	Porites B	1991-1996	**931,46**	C27089	< 0,05	< 0,04	< 0,04
141112B5	Porites B	1986-1991	**696,30**	C27091	< 0,03	< 0,05	< 0,05
141112B6	Porites B	1981-1986	**823,35**	C27047	< 0,16	< 0,05	< 0,05
141112B7	Porites B	1976-1981	**787,35**	C27029	< 0,03	< 0,05	< 0,04
141112B8	Porites B	1970(69)-1976	**1332,56**	C27010	< 0,03	< 0,05	< 0,05
141112B9	Porites B	1964-1969(70)	**733,64**	C27013	< 0,04	< 0,05	< 0,05
141112B10	Porites B	1961-1964	**387,17**	C27025	< 0,12	< 0,12	< 0,13
141112B11	Porites B	1956-1961	**648,32**	C27044	< 0,04	< 0,06	< 0,08
141112B12	Porites B	1951-1956	**771,56**	C27074	< 0,03	< 0,05	< 0,05
141112B13	Porites B	1948-1951	**740,64**	C27070	< 0,04	< 0,05	< 0,05
141112B14	Porites B	1936-1948	**948,28**	C27060	< 0,04	< 0,05	< 0,05

7 Radionucléides naturels émetteurs gamma

Les analyses par spectrométrie gamma avaient également pour objet de rechercher un certain nombre de radionucléides « naturels » émetteurs gamma :

- Chaîne de l'uranium 238 : thorium 234, radium 226, plomb 210
- Uranium 235
- Chaîne du thorium 232 : actinium 228 et plomb 212
- Potassium 40
- Béryllium 7 (origine cosmogénique).

Il convient de préciser que les uranium 234, 235 et 238 sont présents naturellement dans l'écorce terrestre, mais qu'ils peuvent être également des constituants des bombes nucléaires (cf. Annexe 1).

Les principaux résultats d'analyse des radionucléides « naturels » détectables par spectrométrie gamma sont reportés dans les tableaux 6 ci-dessous (Th 234, Ra 226, Pb 210, U235) et 7, page suivante (Ac 228, Pb 212, K40, Be 7).

Tableau 6 : Principaux résultats d'analyses par spectrométrie gamma sur les coraux de Mangareva (radionucléides « naturels » : Th 234, Ra 226, Pb 210, U 235)

N° strate corail (labo CRIIRAD)	Nature	Année (détermination CRIOBE)	N° d'analyse (CRIIRAD)	Th 234 (Bq/kg) CRIIRAD *	Ra 226 (Bq/kg) CRIIRAD	Pb 210 (Bq/kg) CRIIRAD	U 235 (Bq/kg) CRIIRAD
141112A1	Porites A	2006-2012	C27065	26 ± 5	29 ± 3,3	< 1,4	< 4,9
141112A2	Porites A	2001-2006	C27033	24 ± 5	< 0,8	< 1,1	< 3,3
141112A3	Porites A	1996-2001	C27035	25 ± 11	< 1,1	< 3,6	< 8,0
141112A4	Porites A	1991-1996	C27053	29 ± 5	< 0,8	< 1,2	< 3,8
141112A5	Porites A	1986-1991	C27056	26 ± 5	< 0,6	< 1,1	< 3,2
141112A6	Porites A	1981-1986	C27058	26 ± 5	< 0,6	< 1,1	< 3,2
141112A7	Porites A	1976-1981	C27031	27 ± 5	< 0,6	< 1,0	< 2,6
141112A8	Porites A	1972(71)-1976	C26989	26 ± 5	< 0,5	< 1,1	< 3,8
141112A9	Porites A	1964-1971(72)	C26997	20 ± 11	< 0,9	< 3,8	< 8,0
141112A10	Porites A	1956-1964	C27027	27 ± 11	< 1,1	< 4,0	< 4,9
141112A11	Porites A	1951-1956	C27015	31 ± 6	< 0,3	< 1,5	< 2,3
141112A12	Porites A	1946-1951	C27052	22 ± 10	< 1,1	< 3,7	< 11,0
141112A13	Porites A	1941-1946	C27024	22 ± 11	< 1,4	< 6,0	< 13,0
141112A14	Porites A	1932-1941	C27018	26 ± 5	< 0,4	< 1,4	< 3,6
141112B1	Porites B	2006-2012	C27068	23 ± 4	14 ± 1,7	< 3,3	< 3,8
141112B2	Porites B	2001-2006	C27087	24 ± 5	< 0,7	< 2,4	< 3,3
141112B3	Porites B	1996-2001	C27082	22 ± 4	< 0,6	< 3,3	< 2,7
141112B4	Porites B	1991-1996	C27089	24 ± 5	< 0,6	< 1,5	< 2,7
141112B5	Porites B	1986-1991	C27091	24 ± 5	< 0,6	< 3,3	< 3,4
141112B6	Porites B	1981-1986	C27047	25 ± 5	< 0,7	< 2,9	< 3,2
141112B7	Porites B	1976-1981	C27029	26 ± 5	< 0,8	< 1,4	< 3,9
141112B8	Porites B	1970(69)-1976	C27010	24 ± 5	< 0,6	< 2,4	< 2,9
141112B9	Porites B	1964-1969(70)	C27013	25 ± 5	< 0,6	< 2,6	< 3,9
141112B10	Porites B	1961-1964	C27025	21 ± 10	< 0,8	< 3,7	< 8,0
141112B11	Porites B	1956-1961	C27044	32 ± 6	< 0,8	< 2,9	< 4,9
141112B12	Porites B	1951-1956	C27074	25 ± 5	< 0,7	< 2,5	< 3,5
141112B13	Porites B	1948-1951	C27070	28 ± 5	< 0,9	< 2,7	< 4,6
141112B14	Porites B	1936-1948	C27060	27 ± 5	< 0,5	< 2,9	< 2,4

* l'activité du thorium 234 est donnée à titre indicatif compte tenu des mécanismes d'autoatténuation (sous estimation de l'activité)

Remarque préalable concernant les sols coralliens (étude de 2005)

Avant de commenter les résultats d'analyse des coraux prélevés en 2012 dans le lagon de Mangareva, il est intéressant de rappeler les résultats obtenus dans le cadre de l'étude menée par la CRIIRAD en 2005 à Mangareva et Hao.

Dans le sol sablonneux du carottage de la chapelle Sainte-Anne effectué par la CRIIRAD en 2005 à Rikitea (Mangareva), constitué d'un matériau de type « soupe de corail », les activités de certains descendants de l'uranium 238 (radium 226) et des descendants du thorium 232 étaient très faibles (par rapport à la moyenne de l'écorce terrestre) et souvent en limite des capacités de détection (< 2 Bq/kg sec).

En revanche, le **thorium 234** (premier descendant de l'uranium 238) avait une activité de l'ordre de 32 à 35 Bq/kg dans les 3 strates. La chaîne de l'uranium 238 était donc caractérisée par un déséquilibre uranium 238 (thorium 234) - radium 226.

A titre exploratoire, une analyse par spectrométrie gamma avait été effectuée sur un échantillon de soupe de corail prélevé à Gatavake (Mangareva) sur une réserve de matériaux en vrac en cours d'extraction au bord du lagon. Le niveau de rayonnement gamma mesuré sur le tas était un des plus faibles enregistrés au cours de la mission (10 coups par seconde avec un scintillomètre DG5). Alors que l'activité du radium 226 était de 1,3 Bq/kg sec, celle du thorium 234 était de 42 Bq/kg sec.

Ceci indique que **les coraux accumulent préférentiellement l'uranium par rapport au radium** et que par conséquent les sols de type corallien sont susceptibles de présenter ce type de déséquilibre uranium 238 / radium 226. L'activité de l'uranium 238-thorium 234 dans les sols coralliens était environ 3 à 4 fois supérieure à celle des terres « grasses ».

Pour le reste, les activités des descendants du thorium 232 et celle du potassium 40 étaient inférieures aux limites de détection.

Thorium 234 et radium 226

Les analyses par spectrométrie gamma effectuées par le laboratoire de la CRIIRAD sur les 28 échantillons de Porites prélevés en juillet 2012 en 2 stations du lagon de Mangareva confirment ce déséquilibre entre le thorium 234 et le radium 226.

Les valeurs d'activité pour le thorium 234 sont données ici à titre indicatif compte tenu des phénomènes d'autoatténuation qui conduisent à une sous estimation de l'activité liée à la faible énergie de la raie gamma utilisée (63 keV). Cela étant, les résultats permettent des constats intéressants.

L'activité de l'uranium 238 (déduite de celle de son premier descendant émetteur gamma, le thorium 234, en faisant l'hypothèse d'un équilibre) est en effet comprise entre 20 et 32 Bq/kg, alors que celle du radium 226 est inférieure à la limite de détection dans 26 strates sur 28 (< 0,3 à < 1,4 Bq/kg).

Le **radium 226** est détecté en revanche dans les **2 strates « de surface »** avec des activités comprises entre **14 et 29 Bq/kg**. Le cas particulier des strates de surface (années 2006-2012) est intéressant et mériterait une recherche complémentaire sur les mécanismes de fixation et de désorption du radium.

Autres radionucléides

Les activités massiques des autres radionucléides naturels détectables par spectrométrie gamma (plomb 210, uranium 235, actinium 228, potassium 40, béryllium 7) sont très faibles et inférieures aux limites de détection obtenues avec cette méthode analytique (tableaux 6 et 7.).

Le plomb 212 n'est détecté que dans une strate sur 28. Il s'agit de la strate superficielle (2006-2012) de la colonie A et l'activité est entachée d'une forte incertitude (0,43 +/- 0,18 Bq/kg).

Tableau 7 : Principaux résultats d'analyses par spectrométrie gamma sur les coraux de Mangareva (radionucléides naturels : Ac 228, Pb 212, K40, Be7)

N° strate corail (labo CRIIRAD)	Nature	Année (détermination CRIOBE)	N° d'analyse (CRIIRAD)	Ac 228 (Bq/kg) CRIIRAD	Pb 212 (Bq/kg) CRIIRAD	K40 (Bq/kg) CRIIRAD	Be7 (Bq/kg) CRIIRAD
141112A1	Porites A	2006-2012	C27065	< 0,9	0,43 ± 0,18	< 7	< 0,3
141112A2	Porites A	2001-2006	C27033	< 0,5	< 0,11	< 1,9	< 0,2
141112A3	Porites A	1996-2001	C27035	< 2,2	< 0,50	< 11	< 0,9
141112A4	Porites A	1991-1996	C27053	< 0,6	< 0,11	< 2,1	< 0,2
141112A5	Porites A	1986-1991	C27056	< 0,5	< 0,10	< 1,8	< 0,2
141112A6	Porites A	1981-1986	C27058	< 0,6	< 0,13	< 3,1	< 0,2
141112A7	Porites A	1976-1981	C27031	< 0,6	< 0,14	< 1,9	< 0,2
141112A8	Porites A	1972(71)-1976	C26989	< 0,5	< 0,13	< 1,7	< 0,2
141112A9	Porites A	1964-1971(72)	C26997	< 2,3	< 0,48	< 7	< 0,9
141112A10	Porites A	1956-1964	C27027	< 2,4	< 0,50	< 11	< 1,0
141112A11	Porites A	1951-1956	C27015	< 0,7	< 0,14	< 2,1	< 0,2
141112A12	Porites A	1946-1951	C27052	< 2,2	< 0,46	< 11	< 0,8
141112A13	Porites A	1941-1946	C27024	< 2,4	< 0,80	< 15	< 1,3
141112A14	Porites A	1932-1941	C27018	< 0,6	< 0,12	< 2	< 0,2
141112B1	Porites B	2006-2012	C27068	< 0,6	< 0,30	< 1,8	< 0,2
141112B2	Porites B	2001-2006	C27087	< 0,5	< 0,13	< 3	< 0,2
141112B3	Porites B	1996-2001	C27082	< 0,6	< 0,11	< 1,9	< 0,2
141112B4	Porites B	1991-1996	C27089	< 0,5	< 0,11	< 1,7	< 0,2
141112B5	Porites B	1986-1991	C27091	< 0,6	< 0,12	< 3,5	< 0,2
141112B6	Porites B	1981-1986	C27047	< 0,6	< 0,11	< 1,9	< 0,2
141112B7	Porites B	1976-1981	C27029	< 0,6	< 0,11	< 1,9	< 0,2
141112B8	Porites B	1970(69)-1976	C27010	< 0,6	< 0,11	< 2	< 0,2
141112B9	Porites B	1964-1969(70)	C27013	< 1,0	< 0,11	< 2,1	< 0,2
141112B10	Porites B	1961-1964	C27025	< 2,1	< 0,44	< 11	< 0,8
141112B11	Porites B	1956-1961	C27044	< 0,7	< 0,16	< 2,4	< 0,3
141112B12	Porites B	1951-1956	C27074	< 0,6	< 0,21	< 1,9	< 0,2
141112B13	Porites B	1948-1951	C27070	< 0,6	< 0,12	< 3,6	< 0,2
141112B14	Porites B	1936-1948	C27060	< 0,6	< 0,12	< 2	< 0,2

8 Isotopes de l'uranium

L'essentiel de **l'uranium 238** détecté dans les coraux (par son premier descendant le thorium 234) est probablement d'origine naturelle.

Afin de confirmer cette hypothèse, il est nécessaire d'examiner en particulier les rapports U238/U234 et U238/U235.

En effet, l'uranium de qualité militaire est fortement enrichi en uranium 235 et uranium 234.

Pour ce faire, des analyses par **spectrométrie alpha** ont été confiées au laboratoire SUBATECH pour 3 strates par colonie : les 2 strates qui correspondent à la période des essais nucléaires atmosphériques en Polynésie française et la strate inférieure.

Ces analyses ont porté sur les isotopes 238, 234 et 235 de l'uranium (présents naturellement dans l'écorce terrestre) et sur 2 isotopes artificiels :

- L'uranium 232 (émetteur alpha de période 68,9 ans) et
- L'uranium 236 (émetteur alpha de période 23,4 millions d'années).

Les résultats sont reproduits dans le tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8 : Résultats des analyses par spectrométrie alpha sur les coraux de Mangareva (U238, U234, U235, U232, U236))

N° strate corail (labo CRIIRAD)	Nature	Année (détermination CRIOBE)	U238 (Bq/kg) SUBATECH	U234 (Bq/kg) SUBATECH	U238/ U234	U235 (Bq/kg) SUBATECH	U238/ U235	U232 (Bq/kg) SUBATECH	U236 (Bq/kg) SUBATECH
141112A1	Porites A	2006-2012							
141112A2	Porites A	2001-2006							
141112A3	Porites A	1996-2001							
141112A4	Porites A	1991-1996							
141112A5	Porites A	1986-1991							
141112A6	Porites A	1981-1986							
141112A7	Porites A	1976-1981							
141112A8	Porites A	1972(71)-1976	32 ± 4	35 ± 4	0,91	0,95 ± 0,32	33,7	< 0,036	< 0,072
141112A9	Porites A	1964-1971(72)	36 ± 4	40 ± 4	0,90	1,6 ± 0,4	22,5	0,12 ± 0,10	< 0,061
141112A10	Porites A	1956-1964	33 ± 3	39 ± 4	0,85	1,2 ± 0,3	27,5	0,098 ± 0,083	< 0,054
141112A11	Porites A	1951-1956							
141112A12	Porites A	1946-1951							
141112A13	Porites A	1941-1946							
141112A14	Porites A	1932-1941							
141112B1	Porites B	2006-2012							
141112B2	Porites B	2001-2006							
141112B3	Porites B	1996-2001							
141112B4	Porites B	1991-1996							
141112B5	Porites B	1986-1991							
141112B6	Porites B	1981-1986							
141112B7	Porites B	1976-1981							
141112B8	Porites B	1970(69)-1976	33 ± 3	36 ± 3	0,92	1,2 ± 0,3	27,5	< 0,071	< 0,049
141112B9	Porites B	1964-1969(70)	33 ± 3	36 ± 3	0,92	1,2 ± 0,3	27,5	< 0,038	< 0,14
141112B10	Porites B	1961-1964	38 ± 5	44 ± 5	0,86	1,3 ± 0,4	29,2	< 0,057	< 0,099
141112B11	Porites B	1956-1961							
141112B12	Porites B	1951-1956							
141112B13	Porites B	1948-1951							
141112B14	Porites B	1936-1948							

Rapport isotopique U238/U234

Le rapport isotopique U238/U234 est compris entre 0,85 et 0,92 (incertitude de 12 à 17 %) soit une valeur proche de l'unité aux marges d'incertitude près. Ce ratio est compatible avec une situation naturelle.

Rapport isotopique U238/U235

L'uranium 235 est détecté dans les 6 échantillons analysés, mais son activité est déterminée avec une forte marge d'incertitude (25 à 34 %)

Le rapport isotopique U238/U235, compris entre 22,5 et 33,7 est donc entaché d'une incertitude élevée (27 à 36 %) qui ne permet pas de conclure à un écart réellement significatif par rapport au ratio naturel qui est de 21,7.

Afin d'améliorer la précision, la CRIIRAD a demandé au laboratoire SUBATECH de procéder à une détermination du rapport $^{235}U/^{238}U$ au moyen d'une méthode plus sensible **(ICP MS HR** avec ablation laser sur les pastilles de coraux réduits en poudre). Les résultats obtenus, soit entre 0,00706 ± 0,00082 et 0,00732 ± 0,00080 restent dans la gamme des données de la littérature pour une **composition naturelle de l'uranium** comme l'indiquent les 2 références ci-dessous :

- 0,0072623 ± 0,0000021(à k=2) : Pointurier et al.,_Application of Nanosecond-UV Laser Ablation ICP-MS for Isotopic Analaysis of Single Submicrometer-Size Uranium Particles, Anal. Chem 83 (2001) 7841-7848.

- 0,0070439 ± 0,0000035 (à k=2) : Nusimep-6 : Uranium isotope amount ratios in ratios in uranium particles, Interlaboratory Comparison Report, EUR 23702 EN (2008)

Uranium 232 (artificiel)

L'activité de l'uranium 232 est inférieure à la limite de détection dans 4 des 6 strates analysées (< 0,036 à < 0,071 Bq/kg).

L'uranium 232 est détecté dans 2 strates de la colonie A (0,12 +/- 0,10 et 0,098 +/- 0,083 Bq/kg) mais avec une incertitude supérieure à 80 % qui rend toute conclusion hasardeuse.

Uranium 236 (artificiel)

L'activité de l'uranium 236 est inférieure à la limite de détection dans les 6 strates analysées par spectrométrie alpha (< 0,049 à < 0,14 Bq/kg).

Compte tenu des incertitudes importantes sur les résultats obtenus par spectrométrie alpha, la CRIIRAD a demandé au laboratoire ETH à Zurich d'effectuer une détermination de la concentration en uranium 236 au moyen d'une technique très pointue, la **spectrométrie de masse par accélérateur (AMS)**.

Les mesures ont porté sur 10 strates pour chaque spécimen.

Les résultats sont reproduits dans le tableau 9 page suivante.

On constate, pour la colonie Porites B, que la concentration en uranium 236 artificiel d'une part et que le ratio de l'uranium 236 (artificiel) par rapport à l'uranium 238 « naturel » d'autre part augmentent continûment au cours du temps.

Ceci provient très probablement de l'apport d'uranium artificiel imputable aux essais nucléaires atmosphériques, à partir de la fin des années 40 (essais américains).

Les essais effectués par la France en Polynésie française expliquent probablement le saut constaté dans la seconde moitié des années 1960.

Le profil de la colonie A est atypique (voir aussi paragraphe sur le carbone 14 page 27).

Tableau 9 : Résultats de recherche de l'uranium 236 sur les coraux de Mangareva

N° strate corail (ref. CRIIRAD)	Nature	Année (Détermination CRIOBE)	U236 (Bq/kg) SUBATECH	U 236 (10^6 at/g) et incertitude 1 sigma ETH	U 236/ U238 at/at 10^{-12} et incertitude 1 sigma ETH
Période Physique :				**23,4 millions d'années**	**23,4 millions d'années / 4,5 milliards d'années**
141112A1	Porites A	2006-2012			
141112A2	Porites A	2001-2006			
141112A3	Porites A	1996-2001			
141112A4	Porites A	1991-1996			
141112A5	Porites A	1986-1991		6,45 ± 11,2%	991 ± 8,4%
141112A6	Porites A	1981-1986		5,36 ± 5,3%	814 ± 4,0%
141112A7	Porites A	1976-1981		6,27 ± 3,7%	943 ± 2,9%
141112A8	Porites A	1972(71)-1976	< 0,072	6,22 ± 3,1%	939 ± 2,6%
141112A9	Porites A	1964-1971(72)	< 0,061	6,40 ± 3,8%	934 ± 3,1%
141112A10	Porites A	1956-1964	< 0,054	6,38 ± 3,6%	898 ± 3,0%
141112A11	Porites A	1951-1956		7,16 ± 4,4%	991 ± 3,3%
141112A12	Porites A	1946-1951		7,16 ± 3,9%	748 ± 3,9%
141112A13	Porites A	1941-1946		5,75 ± 5,5%	830 ± 4,4%
141112A14	Porites A	1932-1941		4,94 ± 4,1%	722 ± 3,1%
141112B1	Porites B	2006-2012			
141112B2	Porites B	2001-2006			
141112B3	Porites B	1996-2001			
141112B4	Porites B	1991-1996			
141112B5	Porites B	1986-1991		6,25 ± 3,4%	1030 ± 2,6%
141112B6	Porites B	1981-1986		5,67 ± 4,5%	908 ± 2,9%
141112B7	Porites B	1976-1981		5,74 ± 3,5%	913 ± 2,9%
141112B8	Porites B	1970(69)-1976	< 0,049	5,68 ± 3,1%	884 ± 2,5%
141112B9	Porites B	1964-1969(70)	< 0,14	5,32 ± 3,2%	830 ± 2,5%
141112B10	Porites B	1961-1964	< 0,099	5,15 ± 3,2%	736 ± 2,6%
141112B11	Porites B	1956-1961		2,72 ± 5,3%	400 ± 4,1%
141112B12	Porites B	1951-1956		1,00 ± 9,4%	155 ± 7,4%
141112B13	Porites B	1948-1951		0,72 ± 13,7%	103 ± 10,8%
141112B14	Porites B	1936-1948		0,53 ± 15,0%	79 ± 12,2%

9 Tritium

Les résultats concernant la détermination de l'activité du tritium organiquement lié sont reportés dans le tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10 : Détermination de l'activité du tritium sur les coraux de Mangareva

N° strate corail (labo CRIIRAD)	Nature	Année (détermination CRIOBE)	Tritium (Bq/l eau de combustion) / RCD	
141112A1	Porites A	2006-2012		
141112A2	Porites A	2001-2006		
141112A3	Porites A	1996-2001		
141112A4	Porites A	1991-1996		
141112A5	Porites A	1986-1991		
141112A6	Porites A	1981-1986		
141112A7	Porites A	1976-1981	<	3
141112A8	Porites A	1972(71)-1976	<	3
141112A9	Porites A	1964-1971(72)	<	3
141112A10	Porites A	1956-1964	<	3
141112A11	Porites A	1951-1956	<	3
141112A12	Porites A	1946-1951	<	3
141112A13	Porites A	1941-1946		
141112A14	Porites A	1932-1941		
141112B1	Porites B	2006-2012		
141112B2	Porites B	2001-2006		
141112B3	Porites B	1996-2001		
141112B4	Porites B	1991-1996		
141112B5	Porites B	1986-1991		
141112B6	Porites B	1981-1986		
141112B7	Porites B	1976-1981	<	3
141112B8	Porites B	1970(69)-1976	<	3
141112B9	Porites B	1964-1969(70)	<	3
141112B10	Porites B	1961-1964	<	3
141112B11	Porites B	1956-1961	<	3
141112B12	Porites B	1951-1956	<	3
141112B13	Porites B	1948-1951		
141112B14	Porites B	1936-1948		

L'activité du **tritium organiquement lié**, exprimée en becquerel par litre d'eau de combustion est **inférieure à la limite de détection** (< 3 Bq/l d'eau de combustion soit < 2,1 à < 2,2 Bq/kg de corail) pour toutes les strates étudiées.

Compte tenu de la faible proportion de matière organique dans les coraux, ce type de matrice ne semble pas appropriée pour une étude spécifique sur le tritium.

Les essais nucléaires atmosphériques ont pourtant bien conduit à des rejets de tritium.

Dans le milieu terrestre de Mangareva, cet impact a été mis en évidence par l'étude de tranches de cocotier de Rikitea (rapport CRIIRAD N°05-49 publié en 2006). Il s'agissait d'un arbre d'âge antérieur à la période des essais nucléaires (antérieur à 1945). Les résultats sont reproduits pour mémoire dans le tableau 11 ci-après.

Tableau 11 : activité du tritium et du carbone 14 dans la section d'un tronc de cocotier abattu à Rikitea le 7 octobre 2005

Position de l'échantillon	Centre du tronc	proche du centre	proche de la zone extérieure	zone la plus extérieure
Activité du tritium				
OBT (Bq/l)	10 ± 0,9	19 ± 1,5	6,3 ± 0,8	< 3,0
OBT(Bq/kg sec)	5,9 ± 0,6	9,7 ± 0,9	3,5 ± 0,5	< 1,6
Activité du carbone 14				
C14 (Bq/kg carbone)	234 ± 2,0	242 ± 2,0	253 ± 2,2	262 ± 2,2
C14 (Bq/kg sec)	92,4 ± 4,7	94,9 ± 4,8	103,4 ± 5,2	111,7 ± 5,7

10 Carbone 14

Rappels chronologiques

Rappelons que les **essais atmosphériques français** ont été effectués entre **1966 et 1974** à Moruroa et Fangataufa, l'année 1968 étant marquée par l'explosion de la première bombe thermonucléaire française (Canopus ; 2,6 Mt de puissance).

Il ne faut pas oublier que d'autres puissances ont effectué des essais dans le Pacifique antérieurement à la France. Dans les **îles Marshall,** sur les sites de Bikini et Enewetak par exemple les États-Unis ont effectué des essais atmosphériques entre **1946 et 1958**, dont l'essai Castle Bravo (15 Mt de puissance) en 1954, l'un des plus puissants essais américains.

Rappel sur le carbone 14 dans le milieu terrestre à Mangareva

Pour mémoire, dans le milieu terrestre de Mangareva, la contamination en carbone 14 liée à l'impact résiduel des essais nucléaires atmosphériques locaux et mondiaux, a été mise en évidence par l'étude de tranches de cocotier de Rikitea (rapport CRIIRAD N°05-49 publié en 2006 dont les résultats sont reproduits dans le tableau 11 ci-dessus).

Dans le cadre de l'étude de 2005, la CRIIRAD notait également à propos d'échantillons prélevés à Mangareva : « *L'activité du carbone 14 est comparable dans les 2 échantillons d'eau de coco (238 à 242 Bq/kg carbone). Elle est du même ordre de grandeur dans le manioc (241 Bq/kg carbone) et le tarua (244 Bq/kg carbone).* ».

Les coraux gardent la mémoire des essais

Pour l'étude des coraux, les mesures de carbone 14 ont été effectuées en deux temps, d'abord pour les 4 strates de chaque spécimen, centrées autour de la période des essais nucléaires atmosphériques français, puis pour quelques strates plus anciennes et plus récentes.

Les résultats concernant la détermination de l'activité du carbone 14 sont reportés dans le tableau 12 page suivante.

Pour **l'échantillon de Porites B** on note, dans les parties les plus anciennes, une teneur en carbone 14 conforme au niveau naturel attendu avant le début de l'ère nucléaire. C'est le cas, par exemple, pour la strate datée 1936-1948 dont la teneur est de **226 ± 1,9 Bq/Kg C** (becquerel de carbone 14 par kilogramme de carbone). Les valeurs sont comparables, aux marges d'incertitude près, jusqu'à la strate **1956-1961** pour laquelle on observe une hausse sensible : **229 ± 1,9 Bq/Kg C**. Les valeurs augmentent ensuite jusqu'à la strate datée **1970 (69)-1976** avec un pic à **271 ± 2,2 Bq/Kg C**. Il est probable que cette augmentation trouve son origine dans les essais français.

Pour **l'échantillon de Porites A**, le pic est relevé à **273 ± 2,1 Bq/Kg C** pour la strate datée 1951-1956, mais les résultats posent question dans la mesure où la strate la plus ancienne, datée 1932-1941, donc avant l'ère nucléaire, a déjà une teneur anormalement élevée en carbone 14 (245 ± 2,1 Bq/Kg C). On retrouve donc pour cet échantillon des résultats atypiques comme cela a été évoqué page 24 pour l'uranium 236. Est-ce la fiabilité de la datation de la carotte qui est à remettre en question ? La bioerosion fausse-t-elle les résultats par des migrations inter strates ?

L'interprétation fine de ces résultats n'est pas possible en l'état. En revanche, il est clair que les coraux gardent la trace des retombées de carbone 14 imputable aux essais nucléaires.

Tableau 12 : Détermination de l'activité du carbone 14 sur les coraux de Mangareva

N° strate corail (labo CRIIRAD)	Nature	Année (détermination CRIOBE)	C14 (Bq/kg carbone) / RCD
141112A1	Porites A	2006-2012	
141112A2	Porites A	2001-2006	
141112A3	Porites A	1996-2001	
141112A4	Porites A	1991-1996	
141112A5	Porites A	1986-1991	259 ± 2,1
141112A6	Porites A	1981-1986	263 ± 2,2
141112A7	Porites A	1976-1981	263 ± 2,2
141112A8	Porites A	1972(71)-1976	266 ± 2,1
141112A9	Porites A	1964-1971(72)	268 ± 2,4
141112A10	Porites A	1956-1964	271 ± 2,3
141112A11	Porites A	1951-1956	273 ± 2,1
141112A12	Porites A	1946-1951	271 ± 2,1
141112A13	Porites A	1941-1946	261 ± 2,1
141112A14	Porites A	1932-1941	245 ± 2,1
141112B1	Porites B	2006-2012	
141112B2	Porites B	2001-2006	
141112B3	Porites B	1996-2001	
141112B4	Porites B	1991-1996	
141112B5	Porites B	1986-1991	268 ± 2,2
141112B6	Porites B	1981-1986	268 ± 2,2
141112B7	Porites B	1976-1981	265 ± 2,2
141112B8	Porites B	1970(69)-1976	271 ± 2,2
141112B9	Porites B	1964-1969(70)	266 ± 2,1
141112B10	Porites B	1961-1964	248 ± 2,0
141112B11	Porites B	1956-1961	229 ± 1,9
141112B12	Porites B	1951-1956	226 ± 1,9
141112B13	Porites B	1948-1951	224 ± 1,9
141112B14	Porites B	1936-1948	226 ± 1,9

11 Strontium 90

Les résultats concernant la détermination de l'activité du strontium 90 sont reportés dans le tableau 13 page suivante. Les mesures ont été effectuées sur 8 strates par spécimen.

On note que 12 des 16 strates analysées présentent une contamination par le strontium 90 supérieure à la limite de détection. Il est très probable qu'il soit présent en réalité dans toutes les strates analysées. Les valeurs mesurées sont en effet proches des limites de détection ou entachées d'une forte incertitude malgré des temps de comptage de 3 jours pratiqués par le laboratoire.

Pour l'échantillon de Porites B, le maximum est de **0,86+/- 0,30 Bq/kg** pour la strate datée 1956-1961. On note des valeurs comparables pour les strates datées 1976-1981 (0,79 ± 0,33 Bq/kg) et 1986-1991 (0,83+/- 0,28 Bq/kg).

Pour l'échantillon de Porites A, le maximum est de **1,4+/- 0,4 Bq/kg** pour la strate datée 1946-1951. On note une contamination généralisée de 7 des 8 strates analysées, à des niveaux comparables aux marges d'incertitudes près.

Tableau 13 : Détermination de l'activité du strontium 90 sur les coraux de Mangareva

N° strate corail (ref. CRIIRAD)	Nature	Année (Détermination CRIOBE)	Strontium 90 (Bq/kg) SUBATECH
Période Physique :			**29 ans**
141112A1	Porites A	2006-2012	
141112A2	Porites A	2001-2006	
141112A3	Porites A	1996-2001	
141112A4	Porites A	1991-1996	
141112A5	Porites A	1986-1991	0,70 ± 0,17
141112A6	Porites A	1981-1986	0,97 ± 0,31
141112A7	Porites A	1976-1981	< 0,52
141112A8	Porites A	1972(71)-1976	0,91 ± 0,37
141112A9	Porites A	1964-1971(72)	0,76 ± 0,35
141112A10	Porites A	1956-1964	1,03 ± 0,42
141112A11	Porites A	1951-1956	1,2 ± 0,3
141112A12	Porites A	1946-1951	1,4 ± 0,4
141112A13	Porites A	1941-1946	
141112A14	Porites A	1932-1941	
141112B1	Porites B	2006-2012	
141112B2	Porites B	2001-2006	
141112B3	Porites B	1996-2001	
141112B4	Porites B	1991-1996	
141112B5	Porites B	1986-1991	0,83 ± 0,28
141112B6	Porites B	1981-1986	< 0,23
141112B7	Porites B	1976-1981	0,79 ± 0,33
141112B8	Porites B	1970(69)-1976	< 0,42
141112B9	Porites B	1964-1969(70)	0,35 ± 0,10
141112B10	Porites B	1961-1964	0,51 ± 0,26
141112B11	Porites B	1956-1961	0,86 ± 0,30
141112B12	Porites B	1951-1956	< 0,23
141112B13	Porites B	1948-1951	
141112B14	Porites B	1936-1948	

12 Isotopes émetteurs alpha du plutonium

Dans le tableau 14 ci-dessous sont reportés les résultats concernant :

- La détermination de l'activité des émetteurs alpha du plutonium (Pu 238 et Pu 239-240) effectuée par spectrométrie alpha par le laboratoire SUBATECH. Les résultats sont exprimés en Bq/kg avec une marge d'incertitude à 2 sigma. Les temps de comptage en chambre alpha ont été poussés à 7 jours.
- Les valeurs de détermination des rapports isotopiques atomiques Pu 240 / Pu 239 obtenus par spectrométrie de masse couplée à un accélérateur (AMS). Les résultats transmis par le laboratoire ETH de Zurich sont exprimés sous forme d'un ratio (atomes / atomes) et l'incertitude relative est donnée à 1 sigma.

Tableau 14 : Détermination de l'activité de certains isotopes du plutonium et des rapports isotopiques sur les coraux de Mangareva

N° strate corail (ref. CRIIRAD)	Nature	Année (Détermination CRIOBE)	Pu 238 (Bq/kg) SUBATECH	Pu 239-240 (Bq/kg) SUBATECH	Ratio 240/239 (at/at) et incertitude (1 sigma) ETH
Période Physique :			88 ans	24 100 ans et 6 600 ans	
141112A1	Porites A	2006-2012			
141112A2	Porites A	2001-2006			
141112A3	Porites A	1996-2001			
141112A4	Porites A	1991-1996			
141112A5	Porites A	1986-1991	< 0,020	< 0,013	0,088 ± 13,3%
141112A6	Porites A	1981-1986	< 0,015	0,053 ± 0,032	0,108 ± 10,5%
141112A7	Porites A	1976-1981	< 0,018	< 0,022	0,094 ± 7,0%
141112A8	Porites A	1972(71)-1976	< 0,016	< 0,016	0,117 ± 16,9%
141112A9	Porites A	1964-1971(72)	< 0,017	< 0,017	0,093 ± 7,0%
141112A10	Porites A	1956-1964	< 0,036	0,039 ± 0,037	0,094 ± 10,9%
141112A11	Porites A	1951-1956	< 0,016	0,075 ± 0,037	0,054 ± 4,6%
141112A12	Porites A	1946-1951	0,19 ± 0,15	1,4 ± 0,2	0,065 ± 2,6%
141112A13	Porites A	1941-1946			0,075 ± 2,8%
141112A14	Porites A	1932-1941			0,108 ± 2,3%
141112B1	Porites B	2006-2012			
141112B2	Porites B	2001-2006			
141112B3	Porites B	1996-2001			
141112B4	Porites B	1991-1996			
141112B5	Porites B	1986-1991	< 0,010	< 0,013	0,083 ± 7,5%
141112B6	Porites B	1981-1986	< 0,007	< 0,013	0,086 ± 5,4%
141112B7	Porites B	1976-1981	< 0,032	0,49 ± 0,09	0,112 ± 17,3%
141112B8	Porites B	1970(69)-1976	< 0,056	< 0,046	0,147 ± 3,8%
141112B9	Porites B	1964-1969(70)	0,016 ± 0,012	0,11 ± 0,04	0,058 ± 3,0%
141112B10	Porites B	1961-1964	0,021 ± 0,013	0,21 ± 0,04	0,090 ± 2,4%
141112B11	Porites B	1956-1961	< 0,007	0,45 ± 0,06	0,104 ± 10,0%
141112B12	Porites B	1951-1956	< 0,021	0,17 ± 0,06	0,221 ± 3,3%
141112B13	Porites B	1948-1951			0,114 ± 4,4%
141112B14	Porites B	1936-1948			0,144 ± 2,9%

Plutonium 238

L'activité du plutonium 238 est inférieure aux limites de détection (< 0,007 à < 0,036 Bq/kg) dans 13 des 16 strates analysées. Pour les 3 strates pour lesquelles l'activité est publiée, elle est entachée d'une forte incertitude (supérieure à 50 %). Les valeurs sont de 0,021 +/- 0,013 Bq/kg et 0,016 +/- 0,012 Bq/kg respectivement pour les strates datées 1961-1964 et 1964-1969 (70) de Porites B. La valeur la plus élevée est de **0,19 +/- 0,15 Bq/kg** pour la strate datée 1946-1951 de Porites A.

Plutonium 239-240

L'activité du plutonium 239-240 est inférieure aux limites de détection (< 0,013 à < 0,046 Bq/kg) dans 7 des 16 strates analysées.

Dans le spécimen A, l'activité est quantifiable pour 4 strates, mais avec de fortes incertitudes. La valeur la plus élevée étant de **1,4 +/- 0,2 Bq/kg** pour la strate datée 1946-1951.

Dans le spécimen B, l'activité est quantifiable pour 5 strates mais avec des incertitudes relativement élevées. Les activités les plus élevées concernent les strates datées **1956-1961** (**0,45 +/- 0,06 Bq/kg**) et **1976-1981** (**0,49 +/- 0,09 Bq/kg**). Dans ces 2 cas, la contamination en plutonium 239-240 est plus de 10 fois supérieure à celle de la strate datée 1970 (69) -1976, pour laquelle l'activité est inférieure à la limite de détection (< 0,046 Bq/kg).

Rapports isotopiques 240/239 pour le plutonium

Les ratio 240/239 sont quantifiables dans les 20 strates étudiées. Ils présentent de fortes variations, entre 0,054 et 0,22 comparables à ce que l'on trouve dans la littérature.

Ces variations temporelles fortes indiquent des apports de plutonium de nature différente sur les Gambier dans la période étudiée. C'est de ce point de vue le spécimen B qui est le plus intéressant à analyser, dans la mesure où le dosage de l'uranium 236 a donné des profils temporels cohérents. S'agissant des plutonium 239 et 240, on peut y relever en effet, au milieu d'un impact global des retombées mondiales, des valeurs plus atypiques comme :

- Le ratio 0,22 pour la strate datée 1951-1956 qui pourrait correspondre aux retombées d'essais à haut rendement comme ceux effectués par les Etats-Unis sur les sites des îles Marshall.
- Le ratio 0,058 pour la strate datée 1964-1969 (70) qui coïncide avec certaines retombées liées aux essais conduits par la France à Moruroa et Fangataufa. Elle présente un ratio isotopique cohérent avec les valeurs mesurées par le CEA[4] dans les sédiments de ces deux atolls.

Une interprétation fine de ces résultats nécessiterait cependant des études complémentaires.

[4] Chiappini R., et al., $^{240}Pu/^{239}$ Pu isotopic ratios and $^{239+240}Pu$ total measurements in surface and deep waters around Mururoa and Fangataufa atolls compared with Rangiroa atoll (French Polynesia), The Science of Total Environment 237/238 (1999) 269-276.

13 Conclusion

L'étude des deux colonies de Porites échantillonnées en **juillet 2012** dans le lagon de Mangareva (Gambier) permet de mettre en évidence l'impact des retombées des essais nucléaires atmosphériques au travers de la détection du **carbone 14**, du **strontium 90**, de l'**uranium 236** (isotope artificiel de l'uranium) et de certains isotopes du **plutonium**. Une partie de la contamination accumulée dans les coraux est imputable aux essais effectués par la France. Les retombées des essais effectués par d'autres puissances à l'échelle globale et régionale est également à prendre en compte comme le montrent les ratios isotopiques des plutonium 239 et 240.

La présente étude revêt un caractère exploratoire. On peut souligner en effet :

- Des problèmes méthodologiques : imprécisions liées à la datation des strates et à leur découpe et à d'éventuels phénomènes de transfert des contaminants d'une strate à l'autre au cours de la vie du corail (diffusion, influence des dattes[5] de mer qui perforent les colonies de Porites et sont susceptibles de créer des voies de transfert de la contamination d'une strate à l'autre, etc..).
- La disparité des résultats entre les 2 spécimen de coraux (A et B). C'est le cas en particulier pour l'uranium 236 et les isotopes du plutonium. Cela confirme l'importance de disposer de nombreux échantillons pour tirer des conclusions solides.
- La complexité des mécanismes d'apport des contaminants dans le milieu marin : retombées atmosphériques directes sur le lagon, retombées atmosphériques sur les terres et transfert secondaire au lagon par lessivage, apport par les eaux du large, qui peuvent engendrer des cinétiques de contamination différentes, etc.
- La multiplicité des apports de radionucléides liés aux essais nucléaires, car outre ceux effectués par la France, il faut tenir compte des impacts sur la région Pacifique des tirs effectués par d'autres puissances nucléaires.

Pour aller plus loin, il serait souhaitable de réaliser une étude avec un pas de temps plus resserré (strates de l'ordre de l'année) et en se focalisant sur la question du plutonium afin de préciser la chronologie de la contamination qui a touché les Gambier et de tenter de mieux cerner les mécanismes de transfert. Pour ce faire, il faudrait pouvoir disposer de colonies de Porites moins affectées par la bioérosion des dattes de mer.

Sur le plan analytique, en particulier pour les isotopes du plutonium et les isotopes artificiels de l'uranium, le recours à des techniques de pointe est recommandé pour obtenir la précision escomptée.

Approfondir les données radioécologiques

Nous écrivions dans le rapport CRIIRAD de 2006 : « *Les prélèvements effectués en octobre 2005 par la CRIIRAD, dans le domaine terrestre, sur Mangareva, Tureia et Hao, n'ont pas révélé d'anomalies radiologiques qui mettraient aujourd'hui en danger la santé publique.*

Ces résultats montrent une situation radiologique très satisfaisante, avec le plus souvent, des niveaux très bas de radioactivité naturelle (en particulier sur les sols coralliens) et une faible contamination résiduelle en césium 137. Ces constats préliminaires permettront de rassurer les populations qui vivent sur ces îles et atolls.

Néanmoins, les résultats des prélèvements effectués en 2005 ont montré que les essais atmosphériques ont laissé des traces de radioéléments issus des explosions nucléaires aériennes dans certains échantillons prélevés de sols, sédiments ou végétaux. »

L'étude des coraux prélevés en 2012 à Mangareva montre également la persistance de cette contamination ancienne.

L'établissement d'un état des lieux radiologique approfondi nécessiterait la réalisation d'analyses complémentaires sur la faune, la flore et la chaîne alimentaire correspondant aux **milieux terrestres et aquatique**. La question de la ciguatera devra faire l'objet d'études spécifiques.

[5] Les dattes de mer ont été éliminées soigneusement avant broyage des échantillons à leur réception au laboratoire de la CRIIRAD.

Exiger la déclassification des documents militaires

Plus globalement, l'appréciation de la situation radiologique actuelle aux Gambier, et la reconstitution des doses subies à l'époque des retombées par les habitants, nécessite que les autorités militaires donnent accès à l'ensemble de la documentation classifiée sur le déroulement des essais, les mesures de radioactivité faites à l'époque aux Gambier, le fonctionnement des installations militaires ou du CEA (gestion des effluents liquides et déchets solides, fonctionnement des dispositifs de filtration d'air du blockhaus et de l'abri pour la population, etc.…).

Il nous parait utile de reproduire ici des extraits des recommandations du rapport CRIIRAD de 2006 qui concernent la déclassification des données concernant la contamination de l'environnement. Nous écrivions :

« Des comparaisons effectuées par la CRIIRAD avec les rares données militaires officielles sur les retombées de 1966 à 1974 font apparaître une irradiation importante liée au passage de masses d'air contaminées suite à certains essais atmosphériques. Le 2 juillet 1966, le niveau de radiation aux Gambier était plus de 1 000 fois supérieur à celui relevé, en France métropolitaine, après le passage du nuage de Tchernobyl (et plus de 100 fois supérieur, le 12 juin 1971, à Tureia).

Le dépôt au sol des radionucléides contenus dans l'air a entraîné, à l'époque des essais, une contamination très importante des eaux, des sols et des denrées alimentaires.

- *L'activité des eaux de pluie a dépassé, aux Gambier et à Tureia, le 26 septembre 1966, respectivement 850 millions de fois et 199 millions de fois le niveau de radioactivité naturelle des précipitations.*
- *L'activité des eaux de pluie aux Gambier, le 26 septembre 1966, a été 69 000 fois supérieure aux valeurs maximales publiées par la DIRCEN pour les eaux de captage des Gambier (essai du 2 juillet 1966).*

Les évaluations de doses conduites par la CRIIRAD, à partir des rares documents classés rendus publics par la revue Damoclès, montent que certaines retombées ont pu conduire à une irradiation externe et interne des populations conduisant à des risques sanitaires non négligeables et dans certains cas inacceptables, au sens des normes de radioprotection internationales.

Ces évaluations montrent que les bilans officiels publiés par la DIRCEN en 1998 (quelques millisieverts par an au maximum) sous-estiment fortement l'impact radiologique des retombées sur la population. Il convient de souligner que les évaluations de doses conduites par la DIRCEN ne prennent pas en compte toutes les retombées, ne tiennent pas compte de la radiosensibilité très élevée des enfants, négligent certains radionucléides comme les isotopes du plutonium, le tritium et le carbone 14 - pourtant présents dans les retombées comme le montrent certains des résultats de la campagne de mesure CRIIRAD (boue de citerne à Tureia et tranche du tronc d'un cocotier à Rikitea). Ces évaluations officielles ne tiennent pas compte par ailleurs des modes de vie réels des populations (ingestion directe des eaux de pluie par exemple).

La plus grande part de cette irradiation externe et de cette contamination interne a été induite par des radionucléides de relativement courte période. Trente à quarante ans après les retombées, ces radionucléides à courte période ont totalement disparu. Une partie des effets sanitaires induits sur les populations exposées à l'époque ou sur leurs descendants a déjà pu se manifester, d'autres pathologies sont à venir.

L'évolution des connaissances sur les effets sanitaires des faibles doses de radiation, en particulier lors de contaminations internes (inhalation et ingestion), montre que les cancers ne sont pas les seules pathologies à craindre, il faut y ajouter des conséquences négatives sur le système immunitaire, le système cardio-vasculaire, le système nerveux ou le système digestif, etc.…

L'évaluation de l'impact des essais atmosphériques de 1966 à 1974 sur la santé des populations et des travailleurs exposés nécessitera :

1 / la communication des rapports militaires, notamment du SMSR et du SMCB, de la période des essais atmosphériques. Ceci afin d'effectuer des évaluations dosimétriques les plus précises possibles. L'interprétation de ces données nécessitera la mise en place d'un groupe de travail incluant des experts militaires et du CEA et des chercheurs indépendants,

2 / la poursuite des études épidémiologiques portant sur les pathologies cancéreuses, mais aussi sur l'ensemble des pathologies non cancéreuses susceptibles d'apparaître chez les personnes exposées et leur descendance,

3 / le lancement d'études biologiques spécifiques sur les personnes exposées (enregistrement des anomalies chromosomiques, dosimétrie biologique, etc..).

Il serait utile, à ce sujet, que soit mis en œuvre un comité de pilotage regroupant des spécialistes de l'ensemble des disciplines concernées ainsi que des représentants des populations, anciens travailleurs et élus »

Annexe 1 / Notions sur la radioactivité et liste des radionucléides liés aux essais nucléaires

Notions sur la radioactivité

En l'absence d'une contamination d'origine artificielle, il existe dans la nature des éléments radioactifs appelés aussi radionucléides ou radio isotopes. Les radionucléides sont caractérisés par leur période radioactive, leur mode de désintégration et le type de rayonnements ionisants qu'ils émettent.

La période radioactive (période physique) est le temps au bout duquel la moitié des radionucléides s'est désintégrée.

L'activité d'un radionucléide donné, c'est-à-dire le nombre de désintégrations par seconde, est exprimée en **Becquerel (Bq).** Un Bq = une désintégration par seconde.

Il existe des radionucléides naturels d'origine tellurique et cosmogénique.

Rappels sur les radionucléides naturels d'origine tellurique

Les principaux radionucléides naturels d'origine tellurique sont :

- L'uranium 238 et ses 13 descendants radioactifs,
- L'uranium 235 et ses 10 descendants radioactifs,
- Le thorium 232 et ses 10 descendants radioactifs.
- Le potassium 40.

Les chaînes de désintégration de l'uranium 238, de l'uranium 235 et du thorium 232 sont présentées en Annexe 2.

Dans l'écorce terrestre non perturbée, les radionucléides des différentes chaînes de désintégration (uranium 238, uranium 235 et thorium 232) sont en général à l'équilibre au sein de leur chaîne. C'est-à-dire que l'activité massique de chacun des descendants est égale à celle du père de la chaîne (par exemple, l'activité du radium 226 est égale à celle de l'uranium 238).

Rappels sur les radionucléides naturels d'origine cosmogénique

Les principaux radionucléides naturels d'origine cosmogénique, c'est-à-dire créés dans la haute atmosphère par l'interaction du rayonnement cosmique et des atomes stables présents dans l'air, sont le **tritium, le béryllium 7 et le carbone 14**.

Rappels sur les modes de désintégration et les rayonnements émis

Les radionucléides se désintègrent en émettant principalement :

- une **particule alpha** (cas de l'uranium 238, du plutonium 239, etc..). Une particule alpha est un noyau d'hélium, ion positif, constitué de 2 protons et de 2 neutrons. Dans le cas d'une désintégration de type alpha, l'atome engendré par cette transmutation a 2 protons et 2 neutrons de moins que son précurseur. L'uranium 238 devient ainsi du thorium 234.

- un **électron bêta** (cas du thorium 234, de l'actinium 228, etc..). Dans ce cas, un neutron se transforme en proton suivi de l'éjection d'un électron. Le produit de cette transmutation a conservé le même nombre de masse que son précurseur, mais son numéro atomique est incrémenté d'une unité. Le thorium 234 devient ainsi du protactinium 234m, et l'actinium 228 du thorium 228.

- A l'issue de la désintégration de type alpha ou bêta, le radionucléide créé peut dans certains cas se désexciter par émission de **rayonnement gamma**. C'est le cas par exemple des radionucléides qui figurent en grisé dans les chaînes de désintégration en Annexe 2.

Principaux radionucléides répandus dans l'environnement par les essais nucléaires atmosphériques

L'explosion d'une bombe nucléaire disperse dans l'atmosphère certains corps radioactifs (radionucléides) contenus initialement dans la bombe (matière nucléaire) et qui n'ont pas participé à la réaction nucléaire (le rendement ne peut être en effet de 100 %).

Les réactions nucléaires mises en œuvre au cours de l'explosion engendrent en outre de nouveaux corps radioactifs qui n'étaient pas présents dans la matière constitutive de l'engin nucléaire. Il s'agit de produits de fission et d'activation et de transuraniens.

Certains des radionucléides répandus « artificiellement » par les explosions atomiques existent déjà dans l'environnement (uranium 238, uranium 235, tritium, carbone 14). Pour ces radionucléides, la mise en évidence d'une contamination « artificielle » nécessite la connaissance des concentrations naturelles attendues dans l'environnement.

Les constituants de la bombe

Bombe A (fission de l'uranium)

Les bombes basées sur la fission de l'uranium contiennent de l'uranium enrichi en isotope 235 (isotope fissile). On y retrouve en plus les isotopes 234 et 238 de l'uranium.

L'uranium naturel est très répandu dans l'écorce terrestre (3 à 4 grammes par tonne en moyenne). L'uranium naturel présente 3 isotopes, tous radioactifs.

Le plus abondant, **l'uranium 238** représente 99,28 % en masse. Il donne naissance à une chaîne radioactive qui comporte 14 produits radioactifs dont **l'uranium 234** (cf. Annexe 2). Ce dernier représente seulement 0,006 % en masse.

L'uranium 235 est moins abondant que l'uranium 238 dans la nature (0,71 % en masse) et donne naissance également à une chaîne de désintégrations (cf. Annexe 2).

L'uranium 235 est le seul isotope naturel[6] de l'uranium qui soit fissile. Pour réaliser une bombe atomique il faut donc disposer d'uranium enrichi en isotope 235. Il faut en théorie environ 15 kg d'uranium 235 pur (c'est à dire d'uranium débarrassé de ses isotopes 234 et 238) et 21 kg s'il s'agit d'uranium enrichi à 80 % en isotope 235 (c'est à dire comportant 80 % d'uranium 235 et 20 % d'uranium 234 et 238). En France, l'usine de Pierrelatte, construite à des fins militaires, a produit, à partir de 1964 de l'uranium enrichi à plus de 90 %.

Bombe A (fission du plutonium)

Le plutonium n'existe pas dans la nature (ou de façon infinitésimale). Il existe 15 isotopes du plutonium.

L'isotope 239 du plutonium est beaucoup plus fissile que l'uranium 235. La masse critique nécessaire en théorie pour fabriquer une bombe atomique au plutonium est de 4,4 kg environ (matériau pur) et 9,6 kg pour un matériau contenant 50 % de plutonium 239.

Le **plutonium 239** est créé dans les réacteurs nucléaires par bombardement neutronique de l'uranium 238 contenu dans le combustible nucléaire. C'est pourquoi on qualifie l'uranium 238 de « matière fertile » (matière qui par transformations donne naissance à des noyaux fissiles).

L'uranium 238 capture un neutron, ce qui donne naissance à l'uranium 239 (période 23,5 minutes) qui se désintègre par émission bêta en neptunium 239. La désintégration par émission bêta de ce dernier (période 2,3 jours) donne naissance au plutonium 239. Le plutonium 239 est un radionucléide émetteur alpha de très longue période (24 100 ans).

[6] Il existe des isotopes artificiels de l'uranium qui sont générés au cours de certaines réactions nucléaires. L'uranium 233 par exemple est produit par capture neutronique sur le thorium 232. L'uranium 233 est fissile. L'uranium 235, par capture neutronique, donne naissance à l'uranium 236 (émetteur alpha de période 25 millions d'années). Par capture neutronique, l'uranium 236 donne ensuite naissance à l'uranium 237 (émetteur bêta, dont la désintégration aboutit à la formation du neptunium 237. L'irradiation du neptunium 237 conduit à la formation de neptunium 238 dont la désintégration par émission bêta aboutit à la formation du plutonium 238.

D'autres isotopes du plutonium sont générés aux cours des réactions nucléaires qui ont lieu au sein du combustible en réacteur. Par capture neutronique, le plutonium 239 se transforme en effet en **plutonium 240** (dans un réacteur classique 28 % des noyaux de plutonium 239 traversés par un neutron donnent naissance, par capture neutronique, au plutonium 240). Le plutonium 240 est un isotope émetteur alpha de longue période (6 563 ans).

Par capture neutronique, le plutonium 240 donne à son tour du **plutonium 241** (émetteur bêta de période 14,4 ans). Le plutonium 241 est fissile, avec un taux de probabilité comparable à celui du plutonium 239.

Par capture neutronique, le plutonium 241 donne naissance au **plutonium 242** (émetteur alpha de période 376 300 ans).

Dans un réacteur nucléaire, les isotopes fissiles du plutonium sont transformés en outre par des réactions de fission (environ 72 % des noyaux de plutonium 239 frappés par un neutron fissionnent). La composition isotopique du plutonium va dépendre de nombreux paramètres (combustible utilisé, type de réacteur, durée d'irradiation dans le réacteur).

Du plutonium de qualité militaire est du plutonium dont la teneur en plutonium fissile (plutonium 239) est élevée. Bien qu'également fissile, l'isotope 241 du plutonium présente deux inconvénients : il disparaît progressivement par désintégration bêta (période de 14 ans) ; de plus, sa désintégration aboutit à la formation d'américium 241 qui accroît les risques radiologiques liés à la manipulation de la bombe (émissions gamma en particulier).

En pratique une bombe au plutonium contient typiquement de l'ordre de 40 % de plutonium 239.

Bombe H (fusion thermonucléaire)

Contrairement aux bombes atomiques classiques (bombes A) où l'énergie provient de la fission d'atomes lourds (uranium 235 ou plutonium 239), la bombe H utilise l'énergie dégagée par la fusion de noyaux atomiques d'éléments légers (deutérium, tritium). Le deutérium est un isotope non radioactif de l'hydrogène. Le **tritium** est un isotope radioactif de l'hydrogène (émetteur bêta, période physique de 12,3 ans). Le tritium est fabriqué dans des installations militaires spécialisées, par irradiation neutronique de lithium 6 (le lithium 6 est un isotope non radioactif du lithium).

Dans les bombes H classiques les isotopes de noyaux légers (deutérium et tritium) sont présents sous forme d'hydrures de lithium 6.

La réaction de fusion nucléaire est déclenchée par une bombe à fission (bombe A, dont l'énergie est typiquement de plusieurs dizaines de kilotonnes) située à proximité d'une « cible » constituée de deux hydrures de lithium (deutérium et tritium) et d'une charge de deutérure de lithium.

Une partie de l'engin est entourée d'un matériau réflecteur capable de réfléchir le rayonnement X et les neutrons produits par l'explosion de la bombe A. Ce réflecteur peut-être constitué **d'uranium 238.**

Le rayonnement émis par l'explosion de la bombe à fission permet la fusion du mélange deutérium tritium de la cible (augmentation de la température et compression).

Les neutrons rapides émis par les réactions initiales transforment les noyaux de lithium de la charge en noyaux d'hélium et de tritium. Ces derniers réagissent avec le deutérium contenu dans l'hydrure de la charge. Dans ces conditions une partie du tritium qui donne naissance à la fusion est généré en continu par la réaction nucléaire elle-même. La puissance d'une bombe H est en théorie quasi illimitée[7] en fonction de la masse de deutérure de lithium utilisé dans la charge.

Dans tous les cas cités ci-dessus il faudrait tenir compte également de la présence au cœur de l'engin nucléaire d'une source de neutrons (pour initier la réaction en chaîne de la bombe à fission).

Il peut s'agir, par exemple, d'une source de **polonium 210** (émetteur alpha de période égale à 138,4 jours) et de béryllium.

[7] La plus puissante bombe nucléaire testée par l'ex Union Soviétique présentait une puissance de l'ordre de 58 Mégatonnes (30 octobre 1961).

Les radionucléides engendrés par l'explosion nucléaire

Il n'est pas possible de dresser ici la liste exhaustive de tous les éléments radioactifs artificiels créés par l'explosion d'une bombe à fission ou à fusion.

On peut retenir qu'il en existe 3 catégories : les produits de fission, les produits d'activation et les transuraniens.

Les produits de fission.

La fission des noyaux lourds (uranium 235, plutonium 239) donne naissance à deux (et parfois trois) noyaux plus petits. Il s'agit essentiellement d'isotopes radioactifs dont beaucoup n'existent pas dans la nature. Ces isotopes (plus de 300) appartiennent aux familles des éléments situés dans la partie centrale de la table de Mendeleïev. Il s'agit par exemples d'isotopes du strontium (strontium 90), de l'iode (iode 131), du césium (césium 137), du krypton (krypton 85), etc..

Une liste est proposée dans les tableaux pages suivantes (la colonne « origine » du tableau porte alors la mention PF –Produits de Fission).

Les produits d'activation

Les produits d'activation résultent de l'interaction des neutrons (émis par les réactions nucléaires de fission ou de fusion) avec les atomes du milieu environnant.

Si la bombe explose à une hauteur suffisante au dessus du sol, il s'agit de radionucléides liés à l'activation des matériaux constitutifs de l'engin nucléaire et de l'air.

Si la bombe explose assez près de la surface du sol – ce fût le cas des tirs sur barge effectués en 1966 et 1967- il faut ajouter aux précédents les radionucléides liés à l'activation des atomes contenus dans l'eau, les sols, les structures métalliques proches, etc…

Au cours de ces réactions, des atomes qui initialement n'étaient pas radioactifs sont « transmutés » en atomes radioactifs.

Par exemple, du tritium est engendré à partir de l'azote de l'air, du lithium 6 (sol, matériau constitutif de la bombe H), du bore , etc., le carbone 14 à partir de l'azote 14 (stable) de l'air, le fer 55 à partir du fer 54 stable, le cobalt 60 à partir du cobalt 59 stable, l'europium 152 à partir de l'europium 151 stable.

Une liste est proposée dans les tableaux pages suivantes (la colonne « origine » du tableau porte alors la mention PA –Produit d' Activation).

Les transuraniens

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, aux cours des réactions nucléaires qui ont lieu au cœur d'un réacteur nucléaire ou lors d'une explosion atomique, les atomes d'uranium et de plutonium présents dans la bombe peuvent capturer un neutron et donner naissance à de nouveaux isotopes de l'uranium, du plutonium ou d'autres éléments chimiques lourds appelés transuraniens (isotopes du neptunium, de l'américium, etc..). Le neptunium 237 par exemple est engendré à partir de l'uranium 238.

Liste provisoire de radionucléides liés aux essais

Compte tenu des éléments exposés ci-dessus, les tableaux ci-après présentent une liste (non exhaustive) des principaux radionucléides liés aux essais nucléaires avec certaines de leurs caractéristiques (origine, période physique, type de désintégration). Lorsque le taux d'émission (et l'énergie) des raies gamma permet le dosage de ces radionucléides par spectrométrie gamma, la case correspondante est coloriée en jaune.

La liste présentée dans le tableau TA-1 ci-dessous est tirée de l'inventaire officiel (document N°4) publié par la DIRCEN (DIRection des Centres d'Expérimentations Nucléaires) en 1998[8] pour établir le terme source contenu dans le sous-sol des atolls de Moruroa et Fangataufa du fait des essais nucléaires souterrains. Il s'agit de radionucléides dont la période physique est supérieure à 1 an.

Tableau TA-1 : Radionucléides de période supérieure à 1 an constituant le terme source dans le sous-sol des atolls de Moruroa et Fangataufa (source : DIRCEN)

Radionucléide	Origine principale	Période (a)	Emission X ou gamma (a)	Mode de désintégration (a)
Tritium ^{3}H	Matière Nuc ++, PA (Li6, etc..)	12,33 ans	non	bêta
Cobalt 60	PA, Co 59 stable	5,27 ans (et 10,47 min.)	oui > 100 %	bêta
Krypton 85	PF	10,72 ans (et 4,48 h)	oui < 1 %	bêta
Strontium 90	PF	28,5 ans	non	bêta
Yttrium 90	fils Sr 90	2,67 j	très faible	bêta
Zirconium 93	PF	1,53 million d'A	oui > 10 %, < 31 keV	bêta
Technetium 99	PF, fils Mo 99	213 000 ans	très faible	bêta
Ruthenium 106 / Rhodium 106	PF	1,02 an (Eq 29,8 sec.)	oui > 30 %	bêta
Antimoine 125	PF	2,73 ans	oui > 100 %	bêta
Iode 129	PF	15,7 millions d'A	oui > 60 %	bêta
Césium 134	PA, Cs 133 (stable)	2 ans (et 2,9 h)	oui > 100 %	bêta
Césium 135	PF, fils Xe 135	3,0 millions d'A	non	bêta
Césium 137	PF	30 ans	oui > 85 %	bêta
Prométheum 147	PF	2,62 ans	très faible	bêta
Samarium 151	PF	90 ans	très faible	bêta
Europium 152	PA, Eu 151 stable	13,3 ans (et 9,32 h)	oui > 100 %	bêta (28 %)
Europium 155	PF	4,96 ans	oui > 80 %	bêta
Neptunium 237	Fils U 237 (et Am 241)	2,14 millions d'A	oui > 80 %	Alpha
Plutonium 238	Matière Nuc., fils Np 238 et Cm 242	87,7 ans	très faible , X 10 %	Alpha
Plutonium 239	Matière Nuc., fils Np 239	24 110 ans	très faible	Alpha
Plutonium 240	Matière Nuc., capture U 238, Pu 239-n	6 563 ans	très faible	Alpha
Plutonium 241	Matière Nuc., capture U 238 et Pu 239	14,4 ans	très faible	bêta
Americium 241	Fils Pu 241	432,7 ans	oui > 75 %	Alpha

Légende (a) Données issues de "Table of Radioactive Isotopes, Browne et Firestone, 1986".
PF : Produit de Fission PA : Produit d'Activation

[8] Geomechanical and Radiological impact of nuclear tests at Mururoa and Fangfataufa (French Polynesia) / CEA-DAM et Ministère de la Défense-DIRCEN / La Documentation Française 1998, Document N°4 Medium –and Long-Term Containment of Underground Nuclear Tests at the CEP : Source Term Inventory and Worst-Case Impact Assessment.

La liste présentée dans le tableau TA-2 ci-dessous est tirée du document N°13 publié par la DIRCEN en 1998 et portant[9] sur les conséquences radiologiques des essais nucléaires atmosphériques sur les îles de Polynésie Française de 1966 à 1994.

Tableau TA-2 : Radionucléides présents lors des retombées atmosphériques en Polynésie Française (source : DIRCEN)

Radionucléide	Origine principale	Période (a)	Emission X ou gamma (a)	Mode de désintégration (a)
Zirconium 95	PF	64,02 jours	oui > 98 %	bêta
Niobium 95	Fils Zr 95	3,61 et 34,97 jours	oui > 25 % et > 99 %	bêta
Molybdène 99	PF	2,75 jours	oui > 100 %	bêta
Tellure 132	PF	3,26 jours	oui > 100 %	bêta
Iode 131	PF	8,04 jours	oui > 100 %	bêta
Iode 132	Fils Te 132	2,28 heures	oui > 100 %	bêta
Iode 133	PF	20,8 heures	oui > 98 %	bêta
Césium 137	PF	30 ans	oui > 85 %	bêta
Baryum 140	PF	12,74 jours	oui > 50 %	bêta
Lanthane 140	PF, fils Ba 140	1,68 jours	oui > 100 %	bêta
Neptunium 239	Activation de l'engin, fils U239 et AM 243	2,35 jours	oui > 100 %	bêta

Légende (a) Données issues de "Table of Radioactive Isotopes, Browne et Firestone, 1986".
PF : Produit de Fission PA : Produit d'Activation

La liste présentée dans le tableau TA-3 ci-dessous regroupe des radionucléides rajoutés par la CRIIRAD, afin de compléter, au mieux l'inventaire.

La réalisation d'une liste exhaustive de tous les radionucléides liés aux essais nucléaires atmosphériques est un travail complexe qui sort du champ de la présente étude (pour les produits d'activation en particulier cela nécessiterait une connaissance approfondie des matériaux constitutifs de l'engin nucléaire et des conditions de tir). Cela nécessiterait la compilation de nombreuses données bibliographiques (dont une grande partie est classifiée) et la création d'un groupe de travail ad hoc comportant des experts militaires.

[9] Geomechanical and Radiological impact of nuclear tests at Mururoa and Fangfataufa (French Polynesia) / CEA-DAM et Ministère de la Défense-DIRCEN / La Documentation Française 1998, Document N°13 Radiological Consequences of the Atmospheric Tests on the Islands of French Polynesia from 1966 to 1994.

Tableau TA-3 : Liste complémentaire de radionucléides potentiellement présents lors des retombées atmosphériques

Radionucléide	Origine principale	Période (a)	Emission X ou gamma (a)	Mode de désintégration (a)
Carbone 14	PA, N14 stable	5 730 ans	non	bêta
Manganèse 54	PA, Fe 54 stable	312,2 jours	oui > 100 %	bêta
Fer 55	PA, Fe 54 stable	2,73 ans	oui > 26 % (< 7 keV)	Capt. Elec.
Sélénium 79	PF	< 65 000 a	non	bêta
Strontium 89	PA, Sr 88 stable	50,5 jour	très faible, < 0,01 %	bêta
Yttrium 91	PF	58,5 jours (et 49,7 min)	très faible, 0,3 %	bêta
Ruthenium 103	PF	39,2 jours	oui > 100 %	bêta
Rhodium 101	PA	3,3 ans	oui > 100 %	bêta
Rhodium 102m	PA	2,9 ans	oui > 100 %	bêta
Palladium 107	PF	6,5 millions d'années	non	bêta
Tellure 127	PF	109 jours (et 9,35 h)	oui > 40 %	IT
Tellure 129	PF	33,6 jours (et 1,16 h)	oui > 30 %	bêta (36 %)
Xénon 133	PF	5,24 jours (et 2,19 j)	oui > 90 %	bêta
Césium 136	PF	13,16 jours (et 19 s)	oui > 100 %	bêta
Cérium 141	PA, Ce 140 stable	32,5 jours	oui > 60 %	bêta
Praséodyme 143	PF	13,6 jours	très faible	bêta
Cérium 144	PF	284,9 jours	oui > 19 %	bêta
Néodyme 147	PF	10,98 jours	oui > 90 %	bêta
Europium 156	PF	15,19 jours	oui > 60 %	bêta
Bismuth 207	PA	32,2 ans	oui > 100 %	Capt. Elec.
Thorium 234	Fils d'uranium 238	24,1 jours	oui > 100 %	bêta
Uranium 234	Associé à U235 et 238	245 000 ans	très faible	Alpha
Uranium 235	Matériau fissile	700 millions d'années	oui > 100 %	Alpha
Uranium 238	Matériau fertile	4,47 milliards d'années	très faible	Alpha
Uranium 237	PA U 236 et U 238	6,75 j	oui > 100 %	bêta

Légende (a) Données issues de "Table of Radioactive Isotopes, Browne and Firestone, 1986".
PF : Produit de Fission PA : Produit d'Activation

ANNEXE 2 : CHAINES DE DESINTREGRATION RADIOACTIVE DES TROIS FAMILLES DE RADIOELEMENTS NATURELS

CHAINE RADIOACTIVE
Famille de l'Uranium 238

Radionucléide	Mode de désintégration	Période physique
Uranium 238	α	4,5 10^9 ans
Thorium 234	β	**24 jours**
Protactinium 234^m	β	**1,2 minutes**
Uranium 234	α	2,5 10^5ans
Thorium 230	α	**7,5 10^4 ans**
Radium 226	α	**1,6 10^3ans**
Radon 222	α	3,8 jours
Polonium 218	α	3 minutes
Plomb 214	β	**27 minutes**
Bismuth 214	β	**20 minutes**
Polonium 214	α	1,6 10^{-4} secondes
Plomb 210	β	**22,3 ans**
Bismuth 210	β	5 jours
Polonium 210	α	138,5 jours
Plomb 206		Stable

Les radionucléides en **gras** dans le tableau, sont **détectables par spectrométrie gamma** directement

CHAINE RADIOACTIVE
Famille de l'Uranium 235

Radionucléide	Mode de désintégration	Période physique
Uranium 235	α	**7 10^8 ans**
Thorium 231	β	25,6 heures
Protactinium 231	α	**3,3 10^4 ans**
Actinium 227	β	21,8 ans
Thorium 227	α	**18,7 jours**
Radium 223	α	**11,4 jours**
Radon 219	α	**3,9 secondes**
Polonium 215	α	1,8 10^{-3} secondes
Plomb 211	β	**36 minutes**
Bismuth 211	α	2,2 minutes
Thallium 207	β	4,8 minutes
Plomb 207		Stable

Les radionucléides en **gras** dans le tableau, sont **détectables par spectrométrie gamma** directement

CHAINE RADIOACTIVE
Famille du Thorium 232

Radionucléide	Mode de désintégration	Période physique
Thorium 232	α	1,4 10^{10}ans
Radium 228	β	5,8 ans
Actinium 228	β	**6,1 heures**
Thorium 228	α	1,9 an
Radium 224	α	3,7 jours
Radon 220	α	55,6 secondes
Polonium 216	α	0,15 secondes
Plomb 212	β	**10,6 heures**
Bismuth 212	α β	**1 heure**
Thallium 208	β	**3 minutes**
Polonium 212	α	3 10^{-7} secondes
Plomb 208		Stable

Les radionucléides en **gras** dans le tableau, sont **détectables par spectrométrie gamma** directement

ANNEXE 3 : Agréments du laboratoire de la CRIIRAD

Le laboratoire de la CRIIRAD est agréé par l'Autorité de Sûreté Nucléaire pour les mesures de radioactivité de l'environnement. La portée détaillée de l'agrément est disponible sur le site internet de l'Autorité de sûreté nucléaire.

Une liste actualisée au 1er juillet 2012 est présentée ci-dessous :

1 / Matrice **eaux** : émetteurs gamma d'énergie inférieure à 100 keV et d'énergie supérieure à 100 keV (agrément valable jusqu'au 30/06/2015) et tritium (agrément valable jusqu'au 30/06/2014).

2 / Matrice **sols** : émetteurs gamma d'énergie inférieure à 100 keV et d'énergie supérieure à 100 keV (agrément valable jusqu'au 30/6/2016), uranium et descendants, thorium et descendants, Ra 226 et descendants, Ra 228 et descendants (agrément valable jusqu'au 30/06/2015).

3 / Matrices **biologiques** : émetteurs gamma d'énergie inférieure à 100 keV et d'énergie supérieure à 100 keV (agrément valable jusqu'au 30/06/2014).

4 / Matrices **gaz** : émetteurs gamma d'énergie inférieure à 100 keV et d'énergie supérieure à 100 keV et gaz halogénés (agrément valable jusqu'au 30/06/2017).

En outre, le laboratoire de la CRIIRAD est agréé pour la mesure du **radon** dans les lieux ouverts au public : niveaux 1 A et 2 (validité jusqu'au 15 septembre 2016).

Le responsable du laboratoire
Bruno CHAREYRON
Ingénieur en physique nucléaire



ANNEXE 4 : Rapport du CRIOBE (datation des colonies de Porites)-3 pages

Rapport d'intervention

Datation de 2 colonies de Porites sp (massive) collectées à Mangareva (Juillet 2012)

Y. Chancerelle

Contexte de la prestation

Dans le contexte d'une analyse des potentielles retombées d'éléments radioactifs sur les Gambiers, le CRIIRAD a réalisé l'extraction de 2 colonies vivantes de corail massifs (*Porites sp.*) sur le récif frangeant de l'île de Mangareva le 5 juillet 2012. Deux coupes de squelettes ont été prélevées selon l'axe vertical de croissance de ces deux colonies. Ces échantillons de section carrée (approximativement 15 cm x 15 cm) et de 90 cm de longueur environ ont été livrés pour analyse au CRIOBE le 12 juillet 2012 pour la phase de datation. Pour chacune des deux colonies et pour les besoins du transport depuis Mangareva, ces échantillons ont été coupés transversalement en 2 parties équivalentes. Ce sont donc 2x2 blocs de 45 cm de long environ qui ont servis de base de travail initial.

Matériel et méthodes

Des lames fines (épaisseur 0,5 cm) ont été extraites des échantillons bruts (figure 1a) et radiographiées aux rayons X. Les radiographies (figure 1b) ont été ensuite analysées sur table lumineuse afin d'identifier les différences de densités périodiques correspondant aux stries de croissance annuelles. Ces stries ont été retranscrites sur calques et le comptage chronologique effectué en année AD à partir de la partie apicale de la colonie vivante à la date de la récolte.

Les datations obtenues à partir des coupes fines ont ensuite été reportées sur la face des coupes brutes. En fonction du cahier des charges donné par le CRIIRAD, les coupes brutes ont été tranchées transversalement sur des sections correspondant à des périodes comprises entre 3 et 7 ans, en fonction des discontinuités physiques rencontrées (demi-coupes, difficultés de lectures liées à la bio-érosion par les « dates de mer » *lithophaga nigra*) et des impératifs de dates des tirs dont la traçabilités est recherchée. Dans la mesure du possible il a été fait en sorte que les années pour lesquelles la traçabilité des tirs est recherchée, ne correspondent pas aux limites de coupe.

La détermination taxonomique au niveau spécifique a été réalisée au laboratoire à partir des critères morphologiques des microstructures de la partie supérieure du squelette.



Figure 1 : Représentations d'une lame fine (1a) et de sa représentation radiographique aux rayons X (1b).

Résultat de l'analyse

Les résultats de l'analyse des deux échantillons sont présentés dans le tableau 1 ci-après. La datation est initiée à partir de la date de prélèvement (5 juillet 2012). Les années civiles AD présentées dans le tableau 1 sont théoriquement référencées à cette date de départ. La lecture des âges est donc à comprendre de juillet à juillet (*e.g.* : 1991 – 1996 correspond à juillet 1991 – juillet 1996). Le degré d'incertitude de datation des stries augmente au fur et à mesure de l'éloignement de la date de prélèvement. Les stries les plus anciennes correspondant à la période jeune de la colonie sont plus difficiles à partitionner en raison notamment d'une rotation de l'axe de croissance des colonies. Aussi ces premières périodes de vie font l'objet de coupes transversales sur des pas de temps correspondant à 1932-1941 pour la colonie A et 1936-1948 pour la colonie B.

L'identification au niveau spécifique indique que les deux colonies sont des *Porites lutea.* Les vitesses de croissance moyennes obtenues dans cette étude ont été comparées à des travaux sur des colonies de *Porites* massif (sp : lutea, australiensis, solida ou lobata) ou dans l'indo pacifique. L'analyse bibliographique montre que vitesse de croissance et taux de calcification sont fortement corrélés aux valeurs moyennes de la température de l'eau (figure 2). La température annuelle moyenne de l'eau de mer du lagon de Mangareva (source : Direction des Ressources Marines de Polynésie française/CRIOBE) obtenues sur la période dec. 2007 – dec. 2011 est de 25,08°C ±2,26. Le report de cette moyenne sur le graphe de la figure 2 correspond à une croissance théorique de 9,27 mm/an. Les deux vitesses évaluées sur les échantillons se situent dans des valeurs proches de ce point théorique et ne présentent donc pas d'anomalie notable.

Tableau 1 : Caractéristiques des échantillons et des données chronologiques déduites.
La mention "Demi coupe " indique la discontinuité physique des échantillons qui pour chacune des 2 colonies ont été coupés en 2 parties pour les besoins de la première partie du transport (Gambier – Papeete).
La datation à jonction des demi-coupes est notée avec un saut d'incertitude d'une année.

	Colonie A	Colonie B
Date de prélèvement	5 juillet 2012	5 juillet 2012
Position géographique (dedrés.centième de degrés)	23.122° S 134.966° W	23.081° S 134.931° W
Longueur des échantillons (cm)	81,5	88
Age estimé de la colonie / Date de recrutement (an / année civile AD)	80 / 1932	76 /1936
Vitesse moyenne de croissance (cm/an)	1,0187	1,1578
Nombre de tranches	14	14
Périodes des tranches	1932 - 1941 1941 - 1946 1946 – 1951 1951- 1956 1956 – 1964 1964 – 1971 (72) Demi coupe 1972 (71) – 1976 1976 – 1981 1981 – 1986 1986 – 1991 1991 – 1996 1996 – 2001 2001 – 2006 2006 - 2012	1936 – 1948 1948 -1951 1951 -1956 1956 -1961 1961 – 1964 1964 -1969 (70) Demi coupe 1970 (69)-1976 1976 – 1981 1981 – 1986 1986 – 1991 1991 – 1996 1996 – 2001 2001 – 2006 2006 - 2012

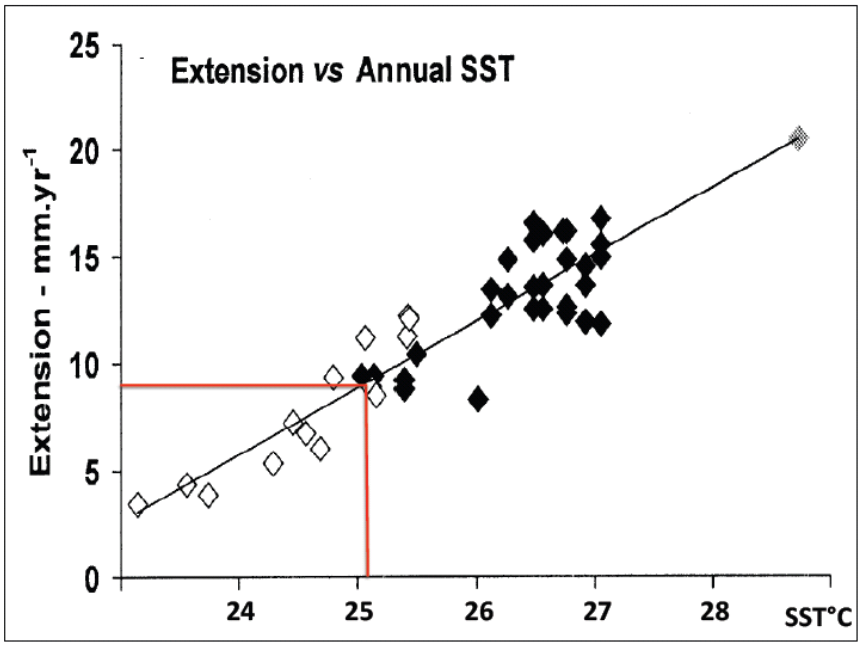


Figure 2 : Représentation graphique de la relation entre la température annuelle moyenne et la vitesse de croissance de colonies de *Porites* massifs sur 44 sites de l'Indo-Pacifique. Les losanges noirs représentent des valeurs moyennes de croissances obtenues sur la Grande Barrière de corail australienne. Les losanges blancs représentent des valeurs moyennes de croissances obtenues sur des récifs Hawaiiens et du sud-est asiatique. D'après Lough, J.B. and Barnes, D.J. (2000). Environmental controls on growth of the massive coral Porites. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 245 : 225-243.
Le report en rouge est calé sur la température moyenne annuelle (période 1997-2011) du lagon de Mangareva dans la zone de collecte des 2 colonies collectées pour la présente étude.

ANNEXE 5 : Liste officielle des essais nucléaires atmosphériques français en Polynésie

Source Ministère de la Défense

ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES						
Date et heure (TU)	Nom de l'essai	Lieu	Mode	Altitude	Énergie totale	Report en jour météo (M) technique (T)
1966						
02/07 - 15 h 34	ALDÉBARAN	Mururoa Dindon	Sur barge	10 m	28 kT	1 (T)
19/07 - 15 h 05	TAMOURÉ	85 km Est Mururoa	Largage avion	1 000 m	50 kT	6 (M)
21/07 - 12 h 00	GANYMÈDE[1]	Mururoa Colette	Sur tour	12 m	0 kT	-
11/09 - 17 h 30	BÉTELGEUSE	Mururoa Denise	Sous ballon	470 m	110 kT	1 (M)
24/09 - 17 h 00	RIGEL	Fangataufa Frégate	Sur barge	3 m	125 kT	10 (M)
04/10 - 21 h 00	SIRIUS	Mururoa Dindon	Sur barge	10 m	205 kT	2 (M)
1967						
05/06 - 19 h 00	ALTAÏR	Mururoa Denise	Sous ballon	295 m	15 kT	4 (M)
27/06 - 18 h 30	ANTARÈS	Mururoa Dindon	Sous ballon	340 m	120 kT	19 (T)
02/07 - 17 h 30	ARCTURUS	Mururoa Denise	Sur barge	3 m	22 kT	-
1968						
07/07 - 22 h 00	CAPELLA	Mururoa Denise	Sous ballon	463 m	115 kT	2 (M)
15/07 - 19 h 00	CASTOR	Mururoa Dindon	Sous ballon	650 m	450 kT	-
03/08 - 21 h 00	POLLUX	Mururoa Denise	Sous ballon	490 m	150 kT	-
24/08 - 18 h 30	CANOPUS	Fangataufa Frégate	Sous ballon	520 m	2,6 MT	-
08/09 - 19 h 00	PROCYON	Mururoa Dindon	Sous ballon	700 m	1,28 MT	-
1970						
15/05 - 18 h 00	ANDROMÈDE	Mururoa Denise	Sous ballon	220 m	13 kT	-
22/05 - 18 h 30	CASSIOPÉE	Mururoa Dindon	Sous ballon	500 m	224 kT	2 (M)
30/05 - 18 h 00	DRAGON	Fangataufa Frégate	Sous ballon	500 m	945 kT	3 (M)
24/06 - 18 h 30	ERIDAN	Mururoa Denise	Sous ballon	220 m	12 kT	-
03/07 - 18 h 30	LICORNE	Mururoa Dindon	Sous ballon	500 m	914 kT	-
27/07 - 19 h 00	PÉGASE	Mururoa Denise	Sous ballon	220 m	0,05 kT	1 (M)
02/08 - 19 h 00	ORION	Fangataufa Frégate	Sous ballon	400 m	72 kT	2 (M)
06/08 - 19 h 00	TOUCAN	Mururoa Dindon	Sous ballon	500 m	594 kT	-

[1] : Essais de sécurité.

ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES						
Date et heure (TU)	Nom de l'essai	Lieu	Mode	Altitude	Énergie totale	Report en jour météo (M) technique (T)
1971						
05/06 - 19 h 15	DIONÉ	Mururoa Denise	Sous ballon	275 m	34 kT	-
12/06 - 19 h 15	ENCELADE	Mururoa Dindon	Sous ballon	450 m	440 kT	2 (M)
04/07 - 21 h 30	JAPET	Mururoa Denise	Sous ballon	230 m	9 kT	-
08/08 - 18 h 30	PHOEBÉ	Mururoa Denise	Sous ballon	230 m	4 kT	3 (M)
14/08 - 19 h 00	RHÉA	Mururoa Dindon	Sous ballon	480 m	955 kT	1 (M)
1972						
25/06 - 19 h 00	UMBRIEL	Mururoa Denise	Sous ballon	230 m	0,5 kT	3 (M) + 1 (T)
30/06 - 18 h 30	TITANIA	Mururoa Dindon	Sous ballon	220 m	4 kT	5 (M)
27/07 - 18 h 40	OBÉRON	Mururoa Dindon	Sous ballon	220 m	6 kT	7 (M)
31/07 - 22 h 30	ARIEL[1]	Mururoa Colette	Sur tour	10 m	0,001 kT	1 (M)
1973						
21/07 - 18 h 00	EUTERPE	Mururoa Dindon	Sous ballon	220 m	11 kT	2 (M)
28/07 - 23 h 06	MELPOMÈNE	Mururoa Denise	Sous ballon	270 m	0,05 kT	3 (M)
18/08 - 18 h 15	PALLAS	Mururoa Denise	Sous ballon	270 m	4 kT	-2 (avancé)
24/08 - 18 h 00	PARTHÉNOPE	Mururoa Dindon	Sous ballon	220 m	0,2 kT	-1 (avancé)
28/08 - 18 h 30	TAMARA	26 km Ouest Mururoa	Largage avion	250 m	6 kT	-
13/09 - 15 h 42	VESTA[1]	Mururoa Colette	Sur tour	4,1 m	0 kT	-
1974						
16/06 - 17 h 30	CAPRICORNE	Mururoa Dindon	Sous ballon	220 m	4 kT	1 (M)
01/07 - 17 h 30	BÉLIER[1]	Mururoa Colette	Sur tour	5,6 m	0 kT	21 (M)
07/07 - 23 h 15	GÉMEAUX	Mururoa Dindon	Sous ballon	312 m	150 kT	-
17/07 - 17 h 00	CENTAURE	Mururoa Denise	Sous ballon	270 m	4 kT	15 (M)
25/07 - 17 h 30	MAQUIS	17 km O-S-O Mururoa	Largage avion	250 m	8 kT	1 (M)
28/07 - 17 h 30	PERSÉE[1]	Mururoa Colette	Sur tour	5,6 m	0,001 kT	-
14/08 - 00 h 30	SCORPION	Mururoa Dindon	Sous ballon	312 m	96 kT	16 (M)
24/08 - 23 h 45	TAUREAU	Mururoa Denise	Sous ballon	270 m	14 kT	-
14/09 - 23 h 30	VERSEAU	Mururoa Dindon	Sous ballon	433 m	332 kT	4 (M)

[1] : Essais de sécurité, faible libération d'énergie pour Ariel et Persée.