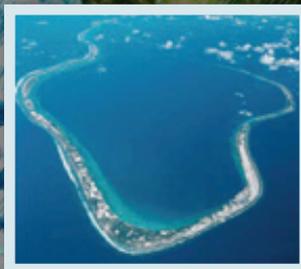


Rapport sur l'examen par des experts internationaux de l'exposition du public aux radiations en Polynésie française suite aux essais atmosphériques nucléaires français

Septembre 2009 – juillet 2010

Organisé par :
l'Agence Internationale de l'Energie Atomique

Organisme français de contrepartie :
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives /
Direction des applications militaires



IAEA

International Atomic Energy Agency

Atoms for Peace

RAPPORT SUR L'EXAMEN PAR DES EXPERTS
INTERNATIONAUX DE L'EXPOSITION DU PUBLIC
AUX RADIATIONS EN POLYNESIE FRANÇAISE
SUITE AUX ESSAIS ATMOSPHERIQUES
NUCLEAIRES FRANÇAIS

Organisé par
l'Agence Internationale de l'Energie Atomique

Homologue français
Commissariat à l'Energie Atomique et
aux Energies Alternatives/
Direction des Applications Militaires

Septembre 2009 – Juillet 2010

AVANT-PROPOS

Différents endroits dans le monde ont été touchés par des résidus radioactifs suite à d'anciennes activités, accidents nucléaires ou en raison d'essais nucléaires. Les inquiétudes concernant l'état de l'environnement et les possibilités désormais meilleures de coopération internationale ont suscité l'intérêt de beaucoup de pays pour l'évaluation de l'impact radiologique sur les populations et l'environnement des zones touchées par les retombées d'essais nucléaires.

Certains sites d'expérimentation se trouvent dans des pays qui ont déjà procédé à une évaluation approfondie de leurs effets sur la santé humaine et l'environnement, et des actions de remédiation ont été menées là où cela était nécessaire ou réalisable. Dans certains cas, il a été jugé opportun que des experts indépendants internationaux examinent et commentent la situation radiologique sur ces sites, de même que les conséquences radiologiques des retombées des essais sur les populations.

Le 22 septembre 1995, une résolution de la Conférence générale de l'AIEA a appelé tous les États à « s'acquitter de leurs responsabilités en veillant à ce que les sites où des essais nucléaires ont été effectués fassent l'objet d'une surveillance scrupuleuse et en prenant des mesures appropriées pour éviter des impacts néfastes sur la santé, la sûreté et l'environnement imputables à ces essais nucléaires ». De ce fait, les gouvernements d'un certain nombre d'États membres ont demandé à l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) de les aider à mener des examens indépendants des effets radiologiques et des méthodes utilisées pour les évaluations.

En 1995, la France a demandé à l'AIEA de procéder à une évaluation indépendante, complète et objective des « conditions radiologiques présentes et futures » des atolls de Mururoa et de Fangataufa. Les résultats de cette évaluation ont été publiés en 1998 dans le rapport intitulé *The Radiological Situation at the Atolls of Mururoa and Fangataufa*, dans la collection des rapports d'évaluation radiologique de l'AIEA.

En 2009, le Gouvernement français a demandé à l'AIEA de mener une étude indépendante sur les estimations rétrospectives des doses de radiation indiquées dans l'ouvrage publié en 2006 par le Commissariat à l'énergie atomique, *La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie*, qui porte sur les essais nucléaires atmosphériques français en Polynésie française.

Le présent rapport contient les résultats de l'examen organisé par l'AIEA avec des experts internationaux sélectionnés pour accomplir ce travail.

DÉNI DE RESPONSABILITÉ

Les informations contenues dans le présent document ont été fournies par les auteurs et n'ont pas été révisées par l'AIEA. Les opinions exprimées relèvent de la responsabilité des auteurs nommés et ne reflètent pas nécessairement celles des gouvernements des États membres désignés. Ni l'AIEA, ni aucun autre organisme ou organe ne peut être tenu pour responsable des informations reproduites dans le présent document.

L'emploi d'appellations particulières pour désigner des pays ou des territoires n'implique de la part de l'AIEA aucune prise de position quant au statut juridique de ces pays ou territoires, ou de leurs autorités et institutions, ni quant au tracé de leurs frontières.

La mention de noms de sociétés ou de produits particuliers (qu'ils soient ou non signalés comme marques déposées) n'implique aucune intention d'empiéter sur des droits de propriété, et ne doit pas être considérée non plus comme valant approbation ou recommandation de la part de l'AIEA.

L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) ne donne aucune garantie et n'assume aucune responsabilité en ce qui concerne la précision, la qualité ou l'authenticité de la traduction/de la publication/de l'impression du présent document et n'accepte aucune responsabilité pour toute perte ou tout dommage, direct ou indirect, consécutif ou autre, de quelque façon qu'il soit causé.

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | SYNTHÈSE | 1 |
| 2. | L'EXAMEN PAR DES EXPERTS INTERNATIONAUX | 4 |
| 2.1. | Contexte | 4 |
| 2.2. | Objectifs de l'examen par des experts | 4 |
| 3. | SOURCES UTILISÉES POUR L'EXAMEN | 6 |
| 3.1. | Rapports et documents | 6 |
| 3.2. | Exposés | 6 |
| 4. | APERÇU DES PROGRAMMES FRANÇAIS ET ÉVALUATION DES DOSES | 8 |
| 4.1. | Programme d'essais nucléaires français en Polynésie | 8 |
| 4.1.1. | Essais atmosphériques et tirs de sécurité | 8 |
| 4.1.2. | Essais souterrains et tirs de sûreté | 9 |
| 4.1.3. | Retombées des essais | 9 |
| 4.2. | Programme français de surveillance radiologique de l'environnement | 9 |
| 4.2.1. | Laboratoires de surveillance environnementale | 9 |
| 4.2.2. | Surveillance de l'environnement | 9 |
| 4.2.3. | Sites d'essais nucléaires | 10 |
| 4.2.4. | Procédures de surveillance des sites | 10 |
| 4.2.5. | Surveillance radiologique de la Polynésie française | 11 |
| 4.2.6. | Échantillonnage environnemental | 11 |
| 4.2.7. | Mesure de la radioactivité | 14 |
| 4.2.8. | Essais d'intercomparaison entre laboratoires | 15 |
| 4.2.9. | Nombre d'échantillons mesurés | 15 |
| 4.3. | Méthode de calcul des doses du CEA | 15 |
| 4.4. | Résultats de la reconstitution des doses pour la Polynésie française | 17 |
| 5. | EXAMEN PAR LES EXPERTS INTERNATIONAUX | 19 |
| 5.1. | Analyse des estimations de doses | 19 |
| 5.1.1. | Remarques générales | 19 |
| 5.1.2. | Exposition externe | 20 |
| 5.1.3. | Exposition interne | 21 |
| 5.1.4. | Anthropogammamétrie | 23 |
| 5.2. | Analyse de chacun des sites | 23 |
| 5.2.1. | Essai/site : Rigel/Tureia | 24 |
| 5.2.2. | Essai/site : Arcturus/Tureia | 26 |
| 5.2.3. | Essai/site : Encelade/Tureia | 28 |
| 5.2.4. | Essai/site : Aldébaran/ îles Gambier | 29 |
| 5.2.5. | Essai/site : Rigel/îles Gambier | 31 |
| 5.2.6. | Essai/site : Phoebé/ îles Gambier | 33 |
| 5.2.7. | Essai/site : Centaure/Pirae | 35 |
| 5.2.8. | Essai/site : Centaure/Hitiaa | 38 |
| 5.2.9. | Essai/site : Centaure/Teahupoo, Taravao | 40 |
| 5.3. | Synthèse des analyses des doses efficaces chez l'adulte et des doses à la thyroïde chez l'enfant | 42 |
| 6. | CONCLUSIONS | 44 |

| | |
|---|-----|
| RÉFÉRENCES..... | 47 |
| APPENDICE I. DOCUMENTS D'APPUI..... | 48 |
| I.1. Le livre <i>La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie</i> Chapitre III: Matériels et méthode de la surveillance radiologique..... | 48 |
| I.2. Le livre <i>La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie</i> Chapitre VI: Protection des travailleurs et des populations..... | 90 |
| I.3. Calcul de l'impact dosimétrique des retombées de l'essai 'Arcturus' à Tureia (Dossier d'Etude Technique, CEA-DAM)..... | 146 |
| I.4. Calcul de l'impact radiologique des essais nucléaires atmosphériques réalisés sur les sites de Polynésie française..... | 173 |
| APPENDICE II. QUESTION DE LA VITESSE DE DÉPÔT..... | 188 |
| APPENDICE III. INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES FOURNIES PAR LA FRANCE..... | 191 |
| III.1. Description succincte du processus d'évaluation des doses par les homologues français..... | 192 |
| III.2. Réponses des homologues français aux commentaires des experts repris dans le tableau III.1. suite à la première réunion de travail..... | 192 |
| III.3. Réponses fournies aux experts par les homologues français pendant la dernière réunion de travail..... | 194 |
| III.4. Examen des documents relatifs aux mesures de radioactivité sur les îles, les atolls et les archipels habités de Polynésie française, publiés de 1966 à 1974..... | 194 |
| III.5. Données utilisées pour l'évaluation des doses reçues par la population des îles Gambier après l'essai Aldébaran..... | 195 |
| III.6. Comparaison entre le taux d'iode mesuré et le taux d'iode calculé pour l'essai Centaure..... | 196 |
| III.7. Comparaison entre mesures et calculs..... | 197 |
| III.8. Estimation de la dose due à l'ingestion après l'essai Rigel..... | 197 |
| III.9. Description de l'approvisionnement en eau dans les îles Gambier (juin 1966)..... | 197 |
| III.10. Scénario d'exposition de la population de Taravao..... | 198 |
| III.11. Explication du rapport entre l'activité dans l'eau de pluie et l'activité dans l'eau de boisson (essai Rigel)..... | 198 |
| III.12. Explication du rapport entre l'activité de l'I-131 et l'activité bêta total dans le bémitier géant..... | 199 |
| III.13. Composition isotopique de l'eau de citerne..... | 200 |
| III.14. Mesures de contrôle de la radioactivité dans les aliments à Tahiti..... | 200 |
| III.15. Approvisionnement eau à Tahiti..... | 201 |
| ANNEXE I. MANDAT..... | 202 |
| ANNEXE II. CURRICULUM VITAE DES EXAMINATEURS JUGÉS COMPÉTENTS PAR L'AIEA..... | 208 |
| ANNEXE III. HOMOLOGUES FRANÇAIS..... | 213 |
| ANNEXE IV. IAEA STAFF..... | 214 |

1. SYNTHÈSE

En 2005, le ministre français de la Défense a chargé le Délégué à la sûreté nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la défense (DSND) de réévaluer les anciennes estimations de doses d'irradiation de la population de Polynésie française à la suite des essais nucléaires atmosphériques menés entre 1966 et 1974. Ce réexamen comportait une vérification des données historiques et des estimations de doses réalisées à l'époque des tests en tenant compte des nouvelles informations sur les aliments consommés au moment des essais et des coefficients de dose mis à jour et publiés par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) et d'autres autorités.

Le but de cette réévaluation était de fournir une base technique pour l'indemnisation des personnes exposées en Polynésie française ayant développé des maladies potentiellement liées aux radiations, des années après les essais. Les estimations de dose ont été conçues pour être raisonnablement conservatives, les doses calculées tendant à surévaluer les doses réelles, sans que cette surévaluation soit excessive. La réévaluation s'est concentrée en particulier sur les méthodes et les résultats d'évaluations de dose pour des « groupes critiques »¹ de la population dans des zones spécifiques, et notamment sur les doses à la thyroïde chez les enfants.

Six essais et neuf sites ont été retenus pour faire l'objet de cette réévaluation, dans la mesure où ces essais ont été identifiés comme étant ceux dont les conséquences radiologiques potentielles ont été les plus élevées ; il s'agit des tests : Aldébaran, Rigel, Arcturus, Encelade, Phobé et Centaure. Les résultats de ces réévaluations ont été rendus publics en 2006, grâce à la publication du livre intitulé *La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie* [1].

Les états ayant déjà mené des évaluations radiologiques de l'impact des essais nucléaires sur les populations et l'environnement, ont parfois jugé opportun de procéder à un examen de ces évaluations par des experts indépendants. Par conséquent, les gouvernements d'un certain nombre d'États membres ont demandé à l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) de mener des études indépendantes sur la situation radiologique.

En 2009, le gouvernement français a demandé à l'AIEA de procéder à un examen indépendant de l'étude radiologique menée en 2006 par la voix du DSND. Le but de cet examen par des experts internationaux est d'arriver à une évaluation indépendante de la méthodologie utilisée par la France pour évaluer les doses aux populations exposées en Polynésie française suite aux essais nucléaires atmosphériques français, ainsi qu'à une confirmation de la valeur de ces doses.

Les experts internationaux ont participé à une réunion à Paris pendant deux jours en septembre 2009 pour permettre aux experts français de faire une présentation complète des évaluations menées. Deux réunions consacrées à la rédaction d'un projet de rapport ont eu lieu à Vienne en février et en avril 2010, en présence des experts français, qui avaient un statut d'observateurs et devaient répondre aux questions. Le processus d'examen complet s'est déroulé de septembre 2009 à juillet 2010.

¹ Dans les nouvelles recommandations de la CIPR publiées en 2007 [2], le terme « groupe critique » est remplacé par celui de « personne représentative », le concept restant pratiquement identique.

Les experts internationaux ont examiné la méthodologie d'évaluation des doses pour toutes les voies d'exposition et pour les essais et les sites sélectionnés. Le processus de reconstruction des doses reposait sur de nombreuses mesures de la radioactivité dans l'environnement, notamment dans les aliments, qui permettent d'évaluer les niveaux d'exposition. Dans les scénarios examinés, les doses efficaces estimées (sur le corps entier) et les doses à la thyroïde pour les adultes et les enfants sont les valeurs pertinentes pour estimer les éventuelles conséquences sur la santé des populations de Polynésie française.

Dans la plupart des cas, les doses ont été calculées en utilisant les mesures des dépôts au sol de l'activité bêta total², à partir desquelles les concentrations des radionucléides dans l'air ont été estimées. Il est admis que le transport atmosphérique n'avait pas provoqué de changements de la contribution des radionucléides à l'activité totale. Dans les faits, quelques modifications dans la répartition des nucléides contribuant à l'activité bêta total se produisent avec le temps et la distance, en raison du dépôt des particules les plus grosses. Les pluies pourraient également influencer sur la contribution des radionucléides en faisant disparaître prioritairement les matières les plus solubles. Toutefois, une comparaison entre le pourcentage calculé d'I-131 contribuant à l'activité bêta total avec celui mesuré dans l'herbe a montré une bonne correspondance, ce qui laisse penser que, du moins pour le transport de l'iode et son dépôt, l'hypothèse de maintien de la répartition des radionucléides n'est pas infondée.

L'exposition externe aux rayonnements gamma était composée d'une exposition de courte durée due au passage d'un panache radioactif et d'une exposition longue à des radionucléides déposés sur le sol, la végétation, les bâtiments, etc. du fait des retombées atmosphériques. La dose externe à long terme était évaluée en intégrant sur la durée le débit de dose initialement mesuré dans l'air ou le débit de dose efficace estimé à partir des dépôts au sol. La dose due à l'inhalation d'aérosols atmosphériques a été évaluée à partir de la concentration d'activité dans l'air intégrée au cours du temps. Comme aucune série temporelle suffisamment longue de mesures dans l'air n'est disponible, la concentration d'activité intégrée a généralement été évaluée à partir des dépôts au sol, en utilisant une vitesse de dépôt appropriée. Le choix inapproprié d'une valeur de vitesse de dépôt pour l'évaluation de la dose due à l'inhalation peut entraîner de grandes incertitudes. Cela peut conduire en particulier à une certaine surévaluation de la dose à la thyroïde car l'iode et ses composés, dont les isotopes augmentent la dose à la thyroïde, se caractérisent par une plus grande vitesse de dépôt que les autres radionucléides. Dans la plupart des cas cependant, la part de la dose due à l'inhalation dans la dose efficace ou dans la dose à la thyroïde n'est pas prépondérante.

L'exposition interne par ingestion est due à l'incorporation de radionucléides présents dans les eaux de boisson, le cas échéant, le lait, les produits agricoles et les produits de la pêche. La contribution de ces différentes composantes à la dose due à l'ingestion dépend de chaque site, dans la mesure où elles tiennent aux conditions de vie locales (approvisionnement en eau et en nourriture, etc.) et aux habitudes alimentaires des populations.

Sur certains sites où l'eau potable provient de la récupération des eaux de pluie, l'ingestion d'eau peut être la cause principale des doses internes efficaces et des doses à la thyroïde. La dose interne a été estimée en considérant une consommation d'eau d'un mois à partir de son activité initiale. Il n'a pas été tenu compte de la dilution de l'eau contaminée avec de l'eau

² La radioactivité totale due à l'émission de particule bêta, déduite de mesures sur une eau de pluie ou d'autres échantillons.

non contaminée provenant de sources ou de pluies. Ceci peut avoir pour conséquence une surévaluation importante de la dose provenant des eaux de boisson.

La consommation de produits agricoles produits localement était une contribution importante à la dose efficace et à la dose à la thyroïde. Là où il n'existait pas de consommation de lait de vaches élevées sur des pâturages, la contamination directe des végétaux comestibles était une voie d'exposition importante. A Tahiti, l'ingestion par consommation de lait s'ajoutait à l'incorporation de radionucléides par ingestion de légumes, en particulier chez les enfants. Là où le lait était présent comme voie d'exposition, la consommation de viande ou d'œufs avait moins d'importance.

La distribution des radionucléides de l'activité bêta total des poissons et mollusques a été considérée identique à celle des retombées. Les données de consommation de poissons et mollusques locaux retenus surévalueraient légèrement l'incorporation de radionucléides par les adultes et les enfants via les produits de la pêche.

Les estimations de doses efficaces calculées pour les adultes sont bien en dessous des valeurs qui ont conduit à des effets sur la santé statistiquement observables et sont du même ordre que les doses reçues chaque année du fait du rayonnement naturel en Polynésie française (1-3 mSv/an). La dose moyenne généralement observée chez d'autres populations en raison du rayonnement ambiant est de 1-10 mSv/an. L'organe dans lequel les doses les plus importantes sont relevées est la glande thyroïde, en particulier chez les enfants, chez qui on observe des doses maximales pour la plupart des voies d'exposition dans la tranche d'âge de 1 à 2 ans. Le présent examen a accordé une attention particulière aux estimations de doses à la thyroïde chez les enfants car une augmentation des cancers de la thyroïde a été observée chez les enfants dans d'autres situations d'exposition impliquant le rejet et la dispersion d'iode radioactif.

L'approche retenue pour estimer les doses a été de choisir des valeurs ou de faire des hypothèses relativement pénalisantes, c'est-à-dire de retenir toujours les limites supérieures des estimations de doses. Ceci implique que l'exposition réelle est probablement inférieure à celle calculée dans le livre publié par le ministère de la défense. Cette évaluation maximale s'appuie généralement sur la sélection des valeurs maximales des mesures effectuées sur l'environnement dans les séries de données disponibles pour chaque essai nucléaire et chaque site. En ce qui concerne la dose interne, on a pu constater dans un petit nombre de cas que l'utilisation des résultats de mesures anthropogammamétriques amenait à l'estimation de doses inférieures à celles prévues par la modélisation.

Le présent examen ne contient pas d'analyse quantitative de l'ampleur des incertitudes dans les estimations de dose associées aux résultats de mesure maximum. Dans certains cas, il est probable que les doses à la thyroïde pour les enfants sont plus de 5 fois plus élevées que la réalité et aussi que, dans certains cas, les estimations maximales ne sont applicables qu'à une très petite catégorie de la population (comme dans le cas de l'essai Phoebé aux îles Gambier).

2. L'EXAMEN PAR DES EXPERTS INTERNATIONAUX

2.1. Contexte

En 2005, le ministre français de la défense a confié au délégué à la sûreté nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la défense (DSND), la mission de réévaluer les estimations de doses d'irradiation de la population de Polynésie française suite aux essais atmosphériques nucléaires menés entre 1966 et 1974. Ce réexamen, rendu public par le ministre de la Défense, comportait une vérification des données historiques de surveillance de la radioactivité et des doses réalisées à l'époque des essais en tenant compte des nouvelles informations sur les habitudes alimentaires et des nouveaux coefficients de dose publiés par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) et autres autorités.

Le but de cette réévaluation était de fournir une base technique pour envisager l'indemnisation des personnes exposées en Polynésie française ayant développé des maladies potentiellement liées aux radiations des années après les essais. Les estimations de dose ont été conçues pour être raisonnablement conservatives (c'est-à-dire que les doses calculées tendent à surévaluer les doses réelles, sans que cette surévaluation soit excessive). La réévaluation s'est focalisée en particulier sur les méthodes et les résultats d'évaluations de dose pour des « groupes critiques »³ de la population dans des zones spécifiques, et notamment sur les doses à la thyroïde pour les enfants.

Six essais et neuf sites ont été retenus pour faire l'objet de cette réévaluation, dans la mesure où ces essais ont été identifiés comme étant ceux dont les conséquences radiologiques potentielles sont les plus importantes ; il s'agit des essais : Aldébaran, Rigel, Arcturus, Encelade, Phoebé et Centaure. Les résultats de ces réévaluations ont été rendus publics en 2006, grâce à la publication du livre intitulé *La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie* [1].

2.2. Objectifs de l'examen par des experts

Le but de l'examen était d'arriver à une évaluation indépendante par des experts internationaux de la méthodologie utilisée par la France pour évaluer les doses aux populations exposées en Polynésie française au cours des essais nucléaires atmosphériques français, ainsi qu'à une confirmation de la valeur de ces doses.

L'examen s'est appuyé sur des publications pertinentes de l'AIEA et sur la somme des expertises de l'équipe internationale concernant les méthodes d'évaluation dans des situations similaires.

Le processus d'examen s'est déroulé comme suit :

- (1) *Préparation et lancement* – Une réunion préparatoire entre l'AIEA et les homologues français a été organisée pour définir : (i) le mandat de l'Agence ; (ii) les objectifs de la revue ; (iii) le programme de travail ; et (iv) le matériel de référence (février 2009).

³ Dans les nouvelles recommandations de la CIPR publiées en 2007 [3], le terme « groupe critique » est remplacé par celui de « personne représentative », le concept restant pratiquement identique.

- (2) *Première phase de communication des informations* – Cette phase incluait la transmission à l’AIEA des informations disponibles par les homologues français et sa communication aux experts chargés de l’examen pour une première évaluation (mai 2009).
- (3) *Réunion d’examen* – Une réunion a été organisée à Paris pour permettre aux homologues français de faire une présentation complète des évaluations menées et pour permettre aux membres de l’équipe de débattre de questions techniques concernant certains points (septembre 2009).
- (4) *Première réunion de préparation du rapport* – Une réunion s’est tenue à Vienne en vue de la rédaction du projet de rapport par l’AIEA et le groupe d’experts. Des observateurs du Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives – Direction des Applications Militaires (CEA/DAM) y participaient afin de fournir les explications requises au cours de la réunion et de faire des commentaires du point de vue du DSND (février 2010).
- (5) *Dernière réunion de préparation du rapport* – Une réunion a été organisée à Vienne par l’AIEA, avec le groupe d’experts et des observateurs du CEA, afin de préparer le projet de rapport final prenant en compte les commentaires envoyés par le CEA (avril 2010).
- (6) *Réunion de présentation* – Une réunion s’est tenue à Paris pour présenter aux homologues français le projet de rapport final de l’AIEA, qui comportait un résumé des travaux effectués au cours de l’examen ainsi que ses résultats et conclusions (juillet 2010).

3. SOURCES UTILISÉES POUR L'EXAMEN

3.1. Rapports et documents

- Le livre *La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie* [1] (2006) (en français) :
 - Chapitre III : Matériel et méthodologie de la surveillance radiologique (en français et traduit en anglais), voir Appendice I, item 1.1 ;
 - Chapitre VI : Protection des travailleurs et des populations (en français et traduit en anglais), voir Appendice I, item 1.2;
- Calcul de l'impact dosimétrique des retombées de l'essai Arcturus à Tureia, (en français et traduit en anglais) voir Appendice I, item 1.3 ;
- Calcul de l'impact radiologique des essais nucléaires atmosphériques réalisés sur les sites de Polynésie française (en anglais) voir Appendice I, item 1.4 ;
- Documentation de référence de l'AIEA comprenant les normes de sécurité et les rapports techniques et de sécurité TRS-422 [3] et TRS-472 [4]; et
- La collection des rapports d'évaluation radiologique de l'AIEA intitulée *The Radiological Situation at the atolls of Mururoa and Fangataufa* [5] (1998).

3.2. Exposés

Les sujets suivants ont été présentés par les experts français durant les différentes réunions en réponse aux questions des experts internationaux :

Rencontre initiale de Paris, septembre 2009 :

- Inventaire des résultats des mesures de radioactivité environnementale réalisées en Polynésie française entre 1966 et 1974 ;
- Présentation des 41 essais nucléaires atmosphériques effectués en Polynésie. Essais et sites sélectionnés pour les calculs dosimétriques ;
- Présentation de la méthode utilisée pour l'évaluation de l'impact dosimétrique des essais nucléaires atmosphérique en Polynésie française ; et
- Présentation des résultats pour une sélection d'essais nucléaires.

Suite à l'analyse initiale de cette documentation et aux discussions techniques ayant eu lieu au cours de cette première rencontre à Paris, les experts ont rédigé et envoyé des commentaires à l'AIEA, qui en a réalisé une synthèse présentée dans le tableau III.1 (appendice III). Ces commentaires ont été envoyés aux homologues français pour examen et réponses. Les réponses ont été présentées et débattues avec les évaluateurs pendant la première réunion de préparation du rapport à Vienne. Les réponses rédigées par les homologues français sont retranscrites dans l'appendice III.

Première réunion de préparation du projet de rapport à Vienne, février 2010 :

Durant la première session de travail sur le projet de rapport les exposés présentés par les homologues français sur les sujets retenus sont les suivants :

- Bilan anthropogammamétrique pour deux travailleurs basés à Mangareva après l'essai Aldébaran ;

- Comparaison des reconstitutions de doses reçues par les populations effectuées par le CEA en Polynésie française avec celles calculées par Drozdovitch et. al. (2008) [6].
- Loi du 5 janvier 2010 relative à la reconnaissance et à l'indemnisation des victimes des essais nucléaires français.

Dernière réunion de préparation du projet de rapport à Vienne, avril 2010 :

Durant la seconde session de travail, des questions supplémentaires de la part des évaluateurs ont donné lieu à des réponses complémentaires pour clarifier les détails du processus d'évaluation dosimétrique pour chacun des essais et des sites retenus. Les explications, exposés et informations complémentaires fournis par les homologues français sont énumérés ci-dessous et reproduits en détail dans l'appendice III :

- Calcul de la dose reçue par ingestion après l'essai Rigel ;
- Citernes à eau de Tureia ;
- Données utilisées dans l'évaluation de la dose reçue par les populations des îles Gambier après l'essai Aldébaran ;
- Comparaison du taux d'iode mesuré et calculé pour l'essai Centaure ;
- Comparaison des mesures et des calculs ;
- Calcul de la dose reçue par ingestion après l'essai Rigel ;
- Description de l'adduction d'eau dans les îles Gambier ;
- Scénario dosimétrique pour la population de Taravao ;
- Explication du rapport entre la radioactivité de l'eau de pluie et celle de l'eau potable ;
- Explication du rapport entre la radioactivité I-131 et la radioactivité bêta total dans les bénitiers géants ;
- Concentration des radionucléides de l'eau des citernes ;
- Surveillance des mesures de radioactivité de l'alimentation à Tahiti ;
- Adduction d'eau à Tahiti ;
- Représentativité des mesures dans les différents milieux ;
- Validité du spectre des radionucléides concernés par les mesures dans le but de prendre en compte tous les radionucléides potentiellement présents ;
- Validité de la vitesse de dépôt utilisée pour estimer la concentration atmosphérique déduite de l'analyse des dépôts au sol.

Réunion de présentation à Paris, juillet 2010 :

Un expert représentant de l'équipe d'examineurs internationaux, M. A. McEwan, avec le coordinateur de l'AIEA, M. D. Telleria, s'est rendu à Paris pour faire la présentation finale couvrant la description du processus global d'examen, ses résultats et les conclusions les conclusions de l'équipe d'experts internationaux pour les homologues français.

4. APERÇU DES PROGRAMMES FRANÇAIS ET ÉVALUATION DES DOSES

4.1. Programme d'essais nucléaires français en Polynésie

En juillet 1962, le gouvernement français prit la décision d'établir un site d'essais nucléaires dans le Pacifique Sud – le Centre d'expérimentations du Pacifique (CEP) – sur le territoire sous souveraineté française de Polynésie. Le site choisi pour installer le CEP était l'atoll inhabité de Mururoa, à 460 km au Sud de la plus grande base aérienne de l'atoll d'Hao, qui offrait un accès correct à la principale base logistique de l'île de Tahiti, à 1200 km au Nord-Ouest. Du point de vue des autorités françaises, Mururoa présentait l'avantage de se trouver dans une zone peu peuplée, offrant de bonnes conditions météorologiques nécessaires à la conduite d'essais atmosphériques de grande puissance. Fangataufa, à 40 km au Sud de Mururoa, avait d'abord été envisagé comme poste d'observation mais fut finalement également utilisé pour quelques essais. La loi portant création du CEP fut votée par le Parlement français le 29 mars 1963 et l'aménagement du site de Mururoa commença presque immédiatement. Les premiers soldats arrivèrent en mai 1963 et les premiers travailleurs civils, originaires de l'atoll Anaa dans le Nord-Est de l'archipel des Tuamotu, furent engagés le 7 septembre 1964. Au total, quelques milliers de civils, pour la plupart des Polynésiens, travaillèrent à Mururoa au cours du programme d'essais.

La France procéda à 193 expérimentations nucléaires atmosphériques et souterraines sur les atolls de Mururoa et Fangataufa entre juillet 1966 et janvier 1996. Ces expérimentations nucléaires étaient de deux types : 178, au cours desquelles on fit exploser des engins nucléaires, provoquant d'importantes libérations d'énergie provenant de la fission et, pour certains cas, de la fusion, et 15 étaient des tirs de sécurité, au cours desquels des engins nucléaires à différents stades de leur conception étaient soumis à des conditions simulant des accidents et où les cœurs des armes nucléaires étaient détruits par des explosifs conventionnels, n'entraînant pas, ou, en de rares occasions, très peu, de libération d'énergie de fission.

4.1.1. *Essais atmosphériques et tirs de sécurité*

Le premier essai nucléaire réalisé au CEP le 2 juillet 1966 concernait un engin de 28 kilotonnes (puissance équivalente en TNT) monté sur une barge positionnée sur le lagon de l'atoll de Mururoa (une kilotonne de TNT étant définie comme l'équivalent de 10^{12} calories d'énergie explosive). Trois autres essais sur des barges ont été effectués, deux à Mururoa et un sur le lagon de l'atoll de Fangataufa. Pendant les huit années suivantes, on a fait exploser 34 engins dans l'atmosphère, arrimés à des ballons suspendus au-dessus de l'atoll (31 à Mururoa et 3 à Fangataufa) et trois autres furent lâchés par avion à proximité de Mururoa. L'essai le plus important portait sur un engin thermonucléaire de 2,6 mégatonnes, Canopus, qu'on fit exploser à 520 m au-dessus du lagon de Fangataufa le 24 août 1968. Le dernier essai atmosphérique, Verseau, réalisé le 14 septembre 1974, concernait un engin de 0,3 mégatonne, dont l'explosion a été déclenchée à 433 m au-dessus de Mururoa.

Le gouvernement français a fourni des détails concernant les essais nucléaires menés dans l'atmosphère au CEP. Sur les 46 essais recensés, 41 étaient des essais nucléaires – 37 effectués à Mururoa et 4 à Fangataufa – et 5 étaient des tirs de sécurité. Ces derniers ont été effectués de 1966 à 1974 sur les trois motus Colette, Ariel et Vesta à la pointe Nord de l'atoll de Mururoa, à l'Ouest de la zone Denise. Une petite quantité d'énergie de fission fut libérée lors de deux tirs de sécurité, Ariel et Persée.

4.1.2. Essais souterrains et tirs de sûreté

Les essais souterrains furent introduits en 1975 et poursuivis jusqu'en janvier 1966. En tout, il y eut 137 essais nucléaires souterrains – 127 à Mururoa et 10 à Fangataufa – et 10 tirs de sécurité souterrains, tous menés à Mururoa. Jusqu'en 1981, tous les essais furent menés dans des puits profonds, creusés verticalement dans la roche volcanique en-dessous de la bordure de corail. Par la suite, on procéda aussi à des forages et des essais sous le lagon.

4.1.3. Retombées des essais

Les essais atmosphériques à Mururoa et Fangataufa ont majoritairement concerné des engins suspendus à des ballons, ce qui limitait les retombées locales. Les débris de ce type d'essais se retrouvaient majoritairement dans la couche inférieure de la stratosphère. Quatre essais furent effectués sur des barges et dans trois cas, les engins furent largués depuis des avions. Les cinq tirs de sécurité auxquels on a procédé au-dessus du sol ont provoqué une contamination locale limitée par les matériaux du coeur de l'arme.

4.2. Programme français de surveillance radiologique de l'environnement

4.2.1. Laboratoires de surveillance environnementale

En 1962, une station de prélèvement d'échantillons fut installée à Faaa, près de Papeete sur l'île de Tahiti. Au milieu des années 1960, le CEA et le ministère de la Défense créèrent un laboratoire et deux organismes chargés du contrôle de la radioactivité dans l'environnement, notamment des aliments, en relation avec le programme d'essais nucléaires atmosphériques.

A l'origine, le "Laboratoire pour surveillance radiologique" de Faaa effectuait toutes les analyses. Des rapports annuels sur le programme de contrôle furent envoyés à l'UNSCEAR à partir de 1966.

Le 30 janvier 1964, la Direction des centres d'expérimentations nucléaires (DIRCEN) fut créée pour coordonner les activités du ministère de la Défense et du CEA. Deux services y étaient rattachés : le Service Mixte de Sécurité Radiologique (SMSR) fut chargé de surveiller l'environnement physique (air, eau et sol) et humain et le Service Mixte de Contrôle Biologique (SMCB) de la surveillance de la biosphère, notamment des composants du régime alimentaire.

En 1994, le SMSR et le SMCB fusionnèrent pour former le SMSRB (Service Mixte de Surveillance Radiologique et Biologique). Depuis 1996 le SRCE (Service radioanalyse, chimie et environnement) procède à des analyses radiochimiques sur des échantillons.

Ces laboratoires ont régulièrement participé à des comparaisons nationales et internationales pour valider leurs procédures et leurs résultats de mesure.

4.2.2. Surveillance de l'environnement

La surveillance de l'environnement portait sur les domaines suivants :

(1) Biotopes :

- Atmosphère : à partir d'échantillons d'aérosols et d'eau de pluie.
- Geosphère : à partir d'échantillons de sols, d'eau de source et d'eau de ruisseaux.

- Hydrosphère : à partir d'échantillons d'eau du lagon, d'eau marine, de matières en suspension et de sédiments.
- (2) Biocénose (environnement biologique) :
- La sélection d'espèces retenues pour la surveillance reposait sur la connaissance de l'écologie de la région et de la composition du régime alimentaire des Polynésiens. Les échantillons servant d'indicateurs biologiques étaient prélevés dans l'environnement terrestre (îlot) et marin (lagon et océan). Le programme de prélèvement était adapté aux deux types d'essais nucléaires :
- Les essais atmosphériques, entre 1966 et 1974, où les principaux problèmes de protection radiologique du public étaient liés à la prévision des trajectoires des retombées avant l'essai et à la vérification des expositions aux radiations après l'essai.
 - Les essais souterrains entre 1975 et 1996, où les principales questions liées à la sécurité étaient celles de la vérification du confinement des radionucléides dans la matrice de roche basaltique présente sous les atolls et de la protection radiologique des travailleurs.

4.2.3. Sites d'essais nucléaires

Sur l'anneau corallien des atolls, les points topographiques étaient désignés par des noms de fleurs et d'oiseaux, par des prénoms féminins ainsi que par des éléments de l'alphabet phonétique international. Ces noms servaient à localiser les zones entourant ces points. Pour les essais souterrains effectués sous les lagons, on avait recours à un système de localisation supplémentaire.

Ce système permettait d'identifier le "point zéro" de chaque essai, de même que les zones de contrôle et de localisation pour les prélèvements dans l'environnement.

4.2.4. Procédures de surveillance des sites

Le jour de l'essai nucléaire et les jours suivants, en plus des contrôles de l'atmosphère, une carte de la radioactivité du lagon était établie à partir de mesures directes des débits de dose à la surface de l'eau. Au même moment, des échantillons d'eau de mer étaient prélevés par hélicoptère au niveau du "point zéro". La baisse de la radioactivité de l'échantillon était suivie grâce à des mesures répétées en laboratoire au cours du temps, permettant d'identifier la contribution des différents produits de fission et d'activation. Les jours suivants, des cartes de la répartition de la radioactivité dans le lagon étaient dressées grâce à des missions de reconnaissance utilisant une sonde NaI fixée à l'extrémité d'un câble. Lorsque la radioactivité approchait les limites de détection de la sonde utilisée, des échantillons d'eau étaient prélevés en vue d'effectuer des mesures en laboratoire. Ces cartes étaient utilisées pour décider du retour du personnel sur le site.

Pendant la période des essais nucléaires souterrains, des systèmes fixes mesuraient la radioactivité pour contrôler les rejets, bien qu'on s'attendît à ce qu'ils fussent très faibles.

Des mesures du tritium présent dans l'eau de mer furent obtenues dans des profils verticaux en 1988 à l'Est et à l'Ouest de l'atoll de Mururoa ainsi qu'au large de Tahiti en 1993.

4.2.5. *Surveillance radiologique de la Polynésie française*

Le réseau de stations de contrôle comprenait différentes îles représentant les 5 archipels de la Polynésie française. Le choix de ces îles permettait de tenir compte de la diversité des conditions environnementales et écologiques, de la démographie et des vents dominants susceptibles d'affecter les conséquences des essais nucléaires. La surveillance radiologique à terre était complétée par des mesures effectuées à partir de bouées, de bateaux et d'avions.

Pendant la période des essais nucléaires atmosphériques, des mesures in situ étaient effectuées continuellement par différents équipements et complétées par des mesures en laboratoire sur des échantillons prélevés dans l'environnement, notamment sur des composants du régime alimentaire.

4.2.6. *Échantillonnage environnemental*

(1) Prélèvements atmosphériques :

Aérosols : Les poussières atmosphériques et les aérosols étaient collectés en continu sur des filtres utilisant des échantillonneurs à grand volume. Différents types d'appareils furent utilisés au cours de la période des essais atmosphériques. Les matières radioactives collectées par les filtres étaient ensuite analysées en laboratoire.

Eau de pluie : L'eau de pluie était collectée chaque mois à l'aide de pluviomètres d'une surface d'1 m² en acier inoxydable. Pendant la période des essais atmosphériques, la fréquence des prélèvements était plus élevée que pendant la période des essais souterrains.

(2) Prélèvements d'eau, de sol et de plantes témoins :

Eau de source : Jusqu'à 400 litres d'eau furent collectés.

Eau de boisson : Les prélèvements d'eau de boisson étaient effectués directement au robinet ou dans les réservoirs d'eau de pluie. Le volume des prélèvements est d'environ 40 litres, mais il fut augmenté jusqu'à 700 litres à Tahiti, où les concentrations de radionucléides étaient généralement basses.

Sols : Les sols des îles hautes telles Tahiti sont de différents types (terres d'altitude, zone intermédiaire et plaine côtière). Les sols des atolls, en particulier ceux de Mururoa et Fangataufa sont très pauvres en humus qui pourrait s'accumuler sur le substrat de base constitué de sable ou de blocs de carbonate de calcium. Les échantillons étaient prélevés à la surface du sol soit par grattage d'une surface d'1 cm d'épaisseur sur une zone de 100 cm², soit au moyen d'un calibre de 20 cm × 25 cm, permettant de collecter les 2 premiers centimètres de surface. Les prélèvements de carottes de sols étaient effectués à une profondeur allant jusqu'à 42 cm au moyen d'un carotteur 5 couches.

(3) Légumes :

Quatre espèces de plantes ont été sélectionnées pour servir à la surveillance radiologique des deux sites concernés par les essais nucléaires : la *scaevola sericea* (une plante buissonnante très répandue sur les atolls), l'arbre de fer connu sous le nom d'Aïto (*casuarina equisetifolia*), le cocotier (*coconut palm*) et la papaye (*carica papaya*).

Des feuilles de *Scaevola* et de *Casuarina* non lavées étaient récoltées pour effectuer des mesures. Des échantillons de bois, d'écorce et de tige étaient également prélevés pour des études spécifiques.

(4) Cultures polynésiennes :

Dans tous les archipels, la production agricole locale faisait l'objet d'un contrôle de même que d'autres plantes et animaux.

Des aliments entrant dans le régime alimentaire de la population polynésienne étaient régulièrement collectés dans différentes îles des cinq archipels depuis 1966. On peut les classer en cinq catégories : les légumes feuilles (par exemple, le chou), les légumes fruits (par exemple le concombre), les légumes racines (par exemple le taro), les fruits comme l'ananas, la banane etc. et les viandes, notamment de boeuf produit localement, de chèvre, de porc et de poulet, auxquelles s'ajoutent les œufs.

Des aliments importés sont vendus dans les magasins de Papeete (Tahiti). Des échantillons d'aliments importés achetés à Tahiti, considérés comme représentatifs des aliments vendus dans les autres îles, ont fait l'objet d'analyses.

Les noix de coco sont un aliment important, largement consommé dans toute la Polynésie. L'eau de coco et le copra ont fait l'objet d'une surveillance radiologique depuis 1962.

Les césium, iode, baryum-lanthane et strontium 89 et 90 étaient mesurés dans des échantillons de lait prélevés à Tahiti. Pendant la période des essais, le lait prélevé était acheté directement aux agriculteurs ou dans des laiteries locales, ainsi que sur le marché de Papeete.

(5) Échantillons marins :

La surveillance radiologique de l'environnement marin était menée à l'aide d'échantillons d'eau de mer, de matières en suspension et de sédiments. Les composés organiques étaient surveillés via des échantillons d'algues planctoniques et benthiques et d'espèces de corail, de mollusques, de crustacés et de poissons, dont certains font partie du régime alimentaire des habitants des différents archipels.

Eau de mer : Des échantillons d'eau de surface (de 5 à 2 m de profondeur) étaient collectés (de 100 à 600 litres pour un échantillon d'eau océanique et de 30 à 200 litres pour l'eau du lagon).

Sédiments : Des échantillons de sédiments (de 5 cm d'épaisseur) étaient prélevés à l'aide d'une benne Shipeck. Les échantillons destinés aux mesures des profils de sédiments (pouvant mesurer jusqu'à 1 m de long) étaient collectés à l'aide d'un carottier gravitaire de type Kullenberg.

Plancton : Le plancton présent dans les eaux polynésiennes est caractérisé par sa faible teneur en biomasse, si bien que le prélèvement d'échantillons requiert le filtrage de volumes importants. La biomasse présente dans le plancton est plus importante dans les lagons.

Algues benthiques : Dans la période 1970-1981, les échantillons étaient composés uniquement d'algues poussant sur leur substrat naturel. A partir de 1982, on installa des substrats artificiels (des collecteurs et des concentrateurs d'algues) dans les lagons.

Coraux : Plusieurs espèces de corail étaient surveillées dans les lagons, parmi lesquelles le *Fungia paumotensis* et le *Fungia fungites* étaient régulièrement choisis pour les mesures, en raison de leurs caractéristiques alimentaires différentes et de leur abondance dans les lagons.

Concombres de mer noirs : Parmi les différentes espèces de concombres de mer, seule l'*Holothreia atra* (concombre de mer noir), qui se nourrit de sédiments, était régulièrement utilisée pour la surveillance radiologique dans les lagons.

Mollusques : Quatre espèces de mollusques ont fait l'objet de prélèvements dans les atolls de Polynésie, le bénitier géant (*Tridacna maxima*), la *Pinctada margaritifera*, le troca (*Trochus niloticus*) et le turbo soyeux (*Turbo setosus*). Le bénitier géant est une espèce commune des lagons d'atolls, qui abrite dans ses tissus des algues capables de photosynthèse vivant en symbiose avec lui. Le bénitier filtre d'importants volumes d'eau de mer pour se nourrir de débris organiques en suspension dans l'eau, le zooplancton et le phytoplancton. Même si la concentration de radionucléides est faible dans le plancton, elle peut être très élevée dans le bénitier. C'est pourquoi le bénitier géant est un bon indicateur pour surveiller la radioactivité dans l'eau de lagon. Des bénitiers adultes, d'un diamètre supérieur à 12 cm sont extraits de leur matrice de corail. Les deux valves sont ôtées pour isoler les parties molles. La membrane recouvrant les viscères est incisée pour permettre l'ablation de l'hépatopancréas. Les deux parties obtenues, l'hépatopancréas (200 g en moyenne) et les parties comestibles (1200 g en moyenne) étaient analysées séparément. Pour donner une idée de l'ampleur du programme, on peut mentionner le fait que plus de 2200 échantillons de mollusques ont été collectés et analysés dans l'archipel des Tuamotu entre 1966 et 1974.

Les échantillons des trois autres espèces furent traités de la même manière, c'est-à-dire que les parties comestibles (chair) étaient analysées séparément. Le turbo soyeux était prélevé dans des zones représentatives du récif extérieur.

Homards : Cinq espèces de homards sont présentes en Polynésie française. Les homards vivent de préférence sur les pentes océaniques externes, à des profondeurs pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de mètres. Lors de chaque prélèvement, 10 à 12 individus sont pêchés pour obtenir la quantité de chair nécessaire aux mesures.

Poissons : Les poissons prélevés dans le cadre de la surveillance radiologique appartiennent aux espèces vivant dans le lagon, le récif extérieur ou l'océan. Les quatre espèces de poissons du lagon retenues pour la surveillance étaient le poisson chirurgien, le poisson perroquet, le mullet et le mérrou. Les deux premières espèces sont herbivores et se nourrissent d'algues. Les deux autres sont carnivores et se nourrissent d'écrevisses, de crabes et de crevettes. Elles peuvent atteindre des tailles importantes. Les poissons sont attrapés par des plongeurs au moyen de fusils sous-marins. De deux à trois kilos de chair comestible étaient prélevés, soit 5 à 7 individus, aux fins des mesures de radioactivité.

Quatre espèces de poissons pélagiques faisaient l'objet d'une surveillance, la bonite, le thon, le wahoo et l'espadon. Ils étaient attrapés soit au moyen de lignes de traîne en surface soit à l'aide de lignes de fond au large.

4.2.7. *Mesure de la radioactivité*

(1) Aérosols :

Les activités alpha et bêta total de chaque filtre étaient mesurées immédiatement après leur retrait puis successivement 3 jours et 5 jours après la fin des prélèvements.

Durant les essais souterrains, des mesures systématiques des radionucléides artificiels (Cs-137, Pu-238, Pu-239 et 240) à des activités très faibles nécessitaient d'accumuler des filtres utilisés pendant un mois ou un trimestre. Les mesures par spectrométrie gamma étaient effectuées dans une installation à très faible bruit de fond.

(2) Eau de mer :

La surveillance de la radioactivité de l'eau de mer a changé au cours des années, l'attention étant portée dans un deuxième temps essentiellement sur l'activité volumique des radionucléides ayant une demie-vie assez longue, tels que le Pu-239, le Pu-240 et le Sr-90.

(3) Échantillons biologiques :

La plupart des échantillons prélevés dans le milieu marin étaient disséqués pour extraire les parties utilisées pour l'analyse radiologique.

(4) Traitement des échantillons :

Beaucoup d'analyses étaient faites sur les cendres après calcination des échantillons. Les éléments volatils tels que l'iode étaient recherchés sur les échantillons frais, immédiatement après leur prélèvement. Dans chaque cas, une quantité de matière à calciner était déterminée afin d'obtenir une masse finale d'environ 50 g de cendres pour les mesures de radioactivité. La masse de matières initialement collectées pour chaque échantillon variait de 100 g (pour les coraux) à plusieurs kilogrammes (feuilles, noix de coco, coquillages, poissons, viande, etc.).

(5) Mesures des échantillons :

Une fois écrasée et homogénéisée, la cendre blanche obtenue par minéralisation était soumise à une première mesure directe des radionucléides émetteurs gamma par spectrométrie gamma. On procédait à une analyse radiochimique des radionucléides émetteurs alpha et bêta purs sur des aliquotes de cendres, allant de 1 à 10 g.

Le strontium-90 était isolé de l'échantillon de cendres après dissolution dans l'acide et précipitation des oxalates. Les précipités étaient mesurés à l'aide d'un compteur proportionnel à gaz.

Les isotopes du plutonium étaient extraits par séparation chimique sélective. Après l'ajout de traceurs (Pu-236 et Pu-242) dans l'échantillon, une chromatographie sur échangeurs d'ions puis une électrodéposition sur des disques en acier inoxydable étaient

effectuées. La quantification des isotopes de plutonium émetteurs alpha était effectuée à l'aide de chambres d'ionisation.

Les résultats étaient exprimés en becquerels par kilogramme frais ou par litre, à la date de prélèvement de l'échantillon.

4.2.8. Essais d'intercomparaison entre laboratoires

La participation à des essais d'intercomparaison impliquant plusieurs laboratoires a permis de valider les procédures de mesure et les résultats obtenus sur des échantillons prélevés dans le cadre du programme de surveillance de la radioactivité dans l'environnement.

4.2.9. Nombre d'échantillons mesurés

Entre 1966 et 1996, environ 30 000 échantillons biologiques ont été collectés sur tout le territoire de la Polynésie française. Comme plusieurs types de mesures sont effectués sur chaque échantillon, des centaines de milliers de résultats sont obtenues. Une synthèse de tous les résultats de mesures de radioactivité, dans les environnements physique et biologique, ainsi que des estimations des conséquences radiologiques pour les personnes vivant en Polynésie est envoyée tous les ans à l'UNSCEAR depuis 1966.

4.3. Méthode de calcul des doses du CEA

Les doses efficaces et les doses à la thyroïde évaluées par le CEA ont été calculées selon le schéma général présenté dans la Figure 1. Les voies d'exposition considérées sont :

- l'exposition externe aux dépôts sur le sol associés aux retombées suite au passage du panache radioactif;
- l'exposition externe liée à l'immersion dans le panache;
- l'exposition interne liée à l'inhalation dans le panache;
- l'exposition interne liée à l'ingestion d'aliments, et
- l'exposition interne liée à l'ingestion d'eau et de lait ou d'autres liquides.

Le processus de reconstitution des doses est fondé en grande partie sur des mesures de dépôt (Bq.m^{-2}), principalement de l'activité bêta total. L'activité de chaque radionucléide au cours du temps a été calculée en tenant compte de leur décroissance radioactive depuis le temps zéro de l'essai.

Les valeurs de l'exposition externe due aux dépôts ont été calculées à partir des coefficients de dose publiés pour les valeurs d'exposition dans l'air, converties en valeur de dose efficace par unité de surface de dépôt ($\text{Sv.h}^{-1}/\text{Bq.m}^{-2}$). Les doses externes dues aux dépôts ont ensuite été calculées en intégrant les débits de dose sur le temps, en tenant compte de la décroissance radioactive.

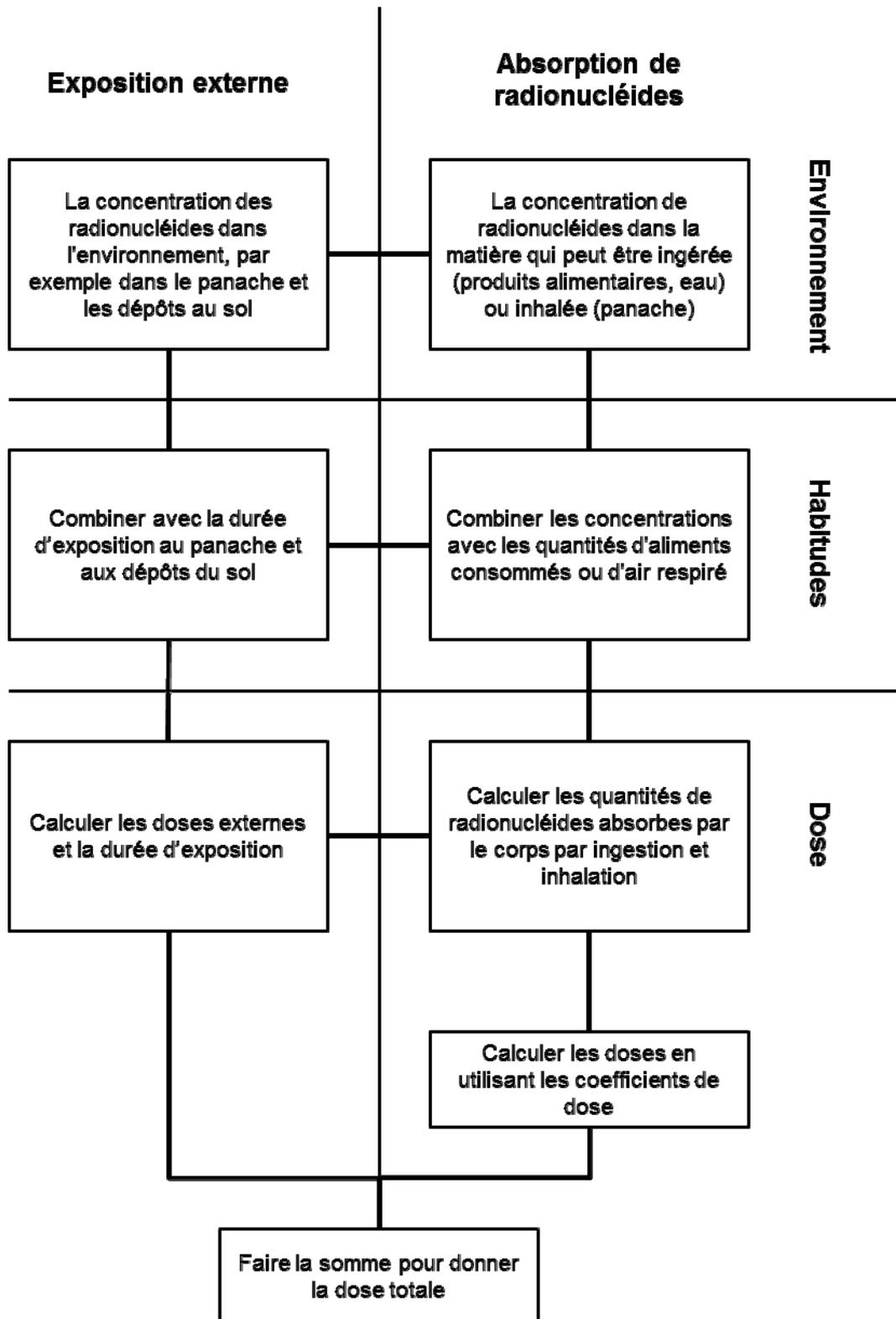


Fig. 1. Mode de calcul des doses.

L'activité de l'air intégrée sur le temps a généralement été estimée à partir des mesures de dépôt, en choisissant une vitesse de dépôt des retombées tenant compte des conditions météorologiques. La vitesse de dépôt dépend de la durée du transfert du panache entre Mururoa (ou Fangataufa) et le site étudié (Tureia, les îles Gambier et Tahiti) et, en particulier, du fait qu'il y ait plu au moment des retombées, ce qui entraîne un lessivage des aérosols. Les vitesses de dépôt peuvent varier sur deux ordres de grandeur, si bien que l'estimation de la concentration de l'activité intégrée du panache a une incertitude plus élevée que sa mesure. Les valeurs des vitesses de dépôt ont été choisies dans l'intervalle $5 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$, les valeurs les plus élevées étant retenues dans les cas de transfert rapide et de pluies pendant les retombées.

Les doses externes et les doses dues à l'inhalation ont été calculées avec les coefficients de dose publiés pour les radionucléides présents dans le panache. Des facteurs modifiant les doses, tels que la protection du shelter ou l'atténuation de l'exposition à l'intérieur des bâtiments, ont été pris en compte.

Des mesures de l'activité dans les aliments et l'eau ont été utilisées lorsqu'elles étaient disponibles pour déterminer l'activité incorporée afin de calculer les doses dues à l'ingestion. Lorsque des mesures de l'activité bêta total étaient disponibles, on a considéré que la composition des radionucléides présents dans les aliments était la même que dans le dépôt, sans tenir compte des variations induites par les facteurs de transfert des radionucléides du dépôt vers les aliments. Dans le cas du lait (à Tahiti), les concentrations de I-131, qui est le contributeur principal des doses à la thyroïde, étaient mesurées directement.

La quantité d'aliments consommés par les adultes a été évaluée grâce à des enquêtes sur les habitudes alimentaires aux îles Gambier et à Tureia, ainsi que pour les populations rurales et urbaines de Tahiti. Pour les enfants, les mêmes enquêtes que pour les adultes ont été ajustées sommairement, en diminuant les quantités consommées, mais en ne les adaptant pas en fonction de la localisation géographique, de la consommation de liquide et de l'apport calorique. La consommation journalière de lait retenue pour les jeunes enfants à Tahiti, qui est particulièrement importante pour l'évaluation de la dose à la thyroïde, semble cependant avoir été évaluée de manière correcte.

4.4. Résultats de la reconstitution des doses pour la Polynésie française

Les tableaux 1 et 2 présentent les estimations de dose efficace pour les adultes et les doses à la thyroïde pour les enfants (de 1 à 2 ans).

Tableau 1. Estimations de doses efficaces chez l'adulte (mSv).

| | Inhalation | Externe/ panache | Externe/ dépôt | Ingestion/ aliments | Ingestion/ eau | TOTAL | Principales voies d'exposition |
|---------------------------|-------------|---------------------|-------------------|------------------------|-------------------|----------|-----------------------------------|
| Rigel-Tureia | 0,002 | négligeable | 0,05 | 0,002-0,074 | 0,01-0,02 | 0,06-0,1 | |
| Arcturus-Tureia | 0,012-0,07 | négligeable | 0,7 | 0,04-2,4 | 0,03 | 0,8-3,2 | fruits de mer |
| Enclade-Tureia | 0,004-0,024 | négligeable | 1,1 | 0,064-0,31 | 0,06-0,46 | 1,2-1,9 | |
| Aldébaran-îles Gambier | 0,1-1,2 | 0,02-0,2 | 2,9 | 0,09-2,2 | 0-1,2 | 3,1-6,6 | |
| Rigel-îles Gambier | négligeable | négligeable | 0,019 | 0,01-0,038 | 0,1-0,17 | 0,1-0,2 | eau |
| Phoebé-îles Gambier | négligeable | négligeable | 0,11 | 0,03-0,66 | 0,1-1,8 | 0,2-2,6 | eau |
| Centaure-Pirae | 0,046 | 0,002 | 0,053 | 0,34 | 0,016 | 0,5 | |
| - Hitiaa | 0,52 | 0,025 | 1,2 | 0,82 | 0,03 | 2,6 | |
| - Taravao | 1,9 | 0,09 | 1,1 | 0,46 | 0,0045 | 3,6 | |

Tableau 2. Estimation des doses à la thyroïde chez l'enfant (1 à 2 ans) (mSv).

| | Inhalation | Externe/ panache | Externe/ dépôt | Ingestion/ aliments | Ingestion/ eau | TOTAL | Principales voies d'exposition |
|---------------------------|------------|---------------------|-------------------|------------------------|-------------------|----------|--|
| Rigel-Tureia | 0,03 | négligeable | 0,05 | 0,06-1,15 | 0,52-0,88 | 0,65-2,1 | |
| Arcturus-Tureia | 0,2-1,4 | négligeable | 0,7 | 0,7-34,8 | 1,24 | 2,2-38 | fruits de mer |
| Enclade-Tureia | 0,14-0,82 | négligeable | 1,1 | 0,71-4,6 | 3,0-21,1 | 4,9-27,6 | eau |
| Aldébaran-îles Gambier | 3-30 | 0,02-0,2 | 2,9 | 1,3-42 | 0-6 | 7,2-81 | inhalation, eau |
| Rigel-îles Gambier | 0,011 | négligeable | 0,019 | 0,15-0,51 | 4,4-7,3 | 4,6-7,8 | eau |
| Phoebé-îles Gambier | 0,01-0,039 | négligeable | 0,11 | 0,52-9,6 | 4,3-88,2 | 4,8-98 | eau |
| Centaure-Pirae | 0,57 | 0,002 | 0,053 | 13 | 0,6 | 14 | lait, fruits de mer, végétaux |
| - Hitiaa | 6,4 | 0,025 | 1,2 | 41 | 1,3 | 50 | lait, fruits de mer, végétaux |
| - Taravao | 24 | 0,09 | 1,1 | 15,4 | 0,22 | 40 | fruits de mer, végétaux, inhalation |

5. EXAMEN PAR LES EXPERTS INTERNATIONAUX

5.1. Analyse des estimations de doses

Dans les sections suivantes, les méthodes et les données utilisées par les experts français pour le calcul des doses sont examinées en détail pour chaque voie d'exposition.

5.1.1. Remarques générales

Les mesures d'activité bêta total effectuées sur le dépôt doivent être transformées en concentrations d'activité des radionucléides pour calculer les doses. La base de données sur la fission et la fusion JEFF (*Joint Evaluated Fission and Fusion*) de l'AEN [7] permet de calculer, à différents temps après l'essai, la radioactivité des radionucléides dans les chaînes de désintégration radioactive.

En pratique, des évolutions dans la répartition des radionucléides contribuant à l'activité bêta total se produisent avec le temps :

- Les radionucléides forment des particules de plus grande taille ou y sont rattachés, lesquelles ont tendance à se déposer plus rapidement.
- Un long transport atmosphérique favorise le dépôt des particules les plus grosses.
- La pluie peut également affecter la répartition des radionucléides en éliminant préférentiellement les matières les plus solubles.

L'hypothèse que « le transport atmosphérique n'a pas provoqué de modification du spectre initial des radionucléides » est une simplification destinée à faciliter les calculs mais l'imprécision qu'elle entraîne pour l'estimation des doses n'est pas facile à quantifier et serait propre à chaque essai et à chaque site.

Cependant, une comparaison entre le pourcentage de I-131 contribuant à l'activité bêta total calculée à l'époque après l'essai Centaure et celui mesuré dans l'herbe à Pirae fait apparaître une bonne correspondance, laissant penser que, du moins en ce qui concerne le transport et le dépôt d'iode, l'hypothèse d'une répartition identique des radionucléides n'est pas dénuée de fondement.

Des modifications de la répartition des radionucléides n'affectent pas les estimations de doses effectuées à partir des mesures directes de radionucléides dans les échantillons, telles que les mesures de concentration d'I-131 dans le lait.

Il est manifeste, au vu des tableaux 1 et 2, que l'exposition interne comme externe contribue à la dose efficace totale chez les résidents et que leur part respective dépend des conditions locales, telles que l'infrastructure et l'économie (approvisionnement en eau et en nourriture, etc.) de même que des habitudes des populations. Dans la plupart des cas, l'ingestion est la principale voie d'exposition expliquant la dose efficace interne et la dose à la thyroïde ; cependant, là où on consomme peu d'aliments et d'eau produits localement, l'inhalation peut devenir la principale contribution à la dose interne et une contribution significative pour la dose efficace totale.

La contribution de l'exposition externe n'est pas incluse dans l'estimation de la dose totale à la glande thyroïde des adultes et des enfants. Toutefois, pour certains essais nucléaires et des localisations spécifiques, la dose externe due au dépôt du sol est une contribution importante à la dose totale, et devrait être ajoutée à la dose interne à la thyroïde. Ceci est particulièrement pertinent pour l'estimation de la dose totale à la thyroïde chez les adultes.

Une certaine surévaluation dans la méthode française de reconstitution des doses d'expositions externe et interne, est attendue car ce sont les résultats de mesures les plus élevés qui ont été retenus parmi ceux disponibles.

Lorsque les concentrations atmosphériques de radionucléides pendant le passage du panache sont estimées à partir du dépôt mesuré, l'évaluation des doses dues à l'inhalation dans le panache et des doses dues à l'exposition externe dépend directement de la valeur choisie pour la vitesse de dépôt. Pour des dépôts secs à une grande distance des atolls de Mururoa et de Fangataufa, les valeurs peuvent être très basses, de l'ordre de $1 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$, tandis qu'en cas de fortes pluies, la vitesse de dépôt peut atteindre une valeur de l'ordre de $3 \times 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$. Néanmoins, dans aucune des retombées, l'exposition externe due au passage du panache n'a pas été un facteur majeur d'exposition. Dans trois des cas étudiés, les doses dues à l'inhalation contribuent majoritairement à la dose à la thyroïde chez les enfants. Ces cas requièrent un examen attentif des valeurs de la vitesse de dépôt utilisées.

La vitesse de dépôt et le lessivage des aérosols par la pluie sont examinés plus en détail à l'Appendice II.

5.1.2. Exposition externe

Il y a deux composantes à l'exposition externe des populations d'une île : une exposition de courte durée au panache radioactif durant son passage au-dessus de l'île et une exposition à long terme aux radionucléides déposés sur le sol et les bâtiments.

5.1.2.1. Exposition au panache

La durée du passage du panache au-dessus de l'île était généralement courte (de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de minutes). Cette exposition de courte durée contribuait de manière mineure à la dose totale. De plus, dans certains cas, les résidents de l'île se trouvaient dans des abris (shelter) pendant le passage du panache, ce qui réduisait encore la dose externe due à celui-ci.

L'estimation de dose basée sur le calcul de l'activité volumique intégrée dans l'air dépend fortement de la valeur de la vitesse de dépôt retenue. Pour cette voie d'exposition, les experts français ont choisi les facteurs de conversion de dose appropriés (pour un débit de dose par unité de concentration d'activité dans l'air) dans le Federal Guidance 12 de l'EPA (1993) [8]. Le processus d'évaluation de la concentration dans l'air à partir des mesures d'activité bêta total effectuées sur le dépôt au sol ont été menées de manière à ne pas sous-estimer la dose externe due à l'immersion dans le panache. Cependant, la contribution de cette dernière à la dose totale est mineure.

5.1.2.2. Exposition due au dépôt de radionucléides

La base des calculs de dose externe liée au dépôt sur le sol reposait, dans la plupart des cas, sur les résultats de mesures effectuées sur le dépôt au sol de radionucléides, ou, dans deux cas, sur le débit de dose dans l'air (classiquement le débit de dose est mesuré à 1 mètre au-dessus du sol) mesuré peu après la fin des retombées. Après les deux premiers essais, le dépôt au sol fut calculé à partir des mesures de concentration dans l'air en utilisant des valeurs de vitesse de dépôts humides ou de dépôts de grosses particules. Le choix de valeurs élevées de vitesse de dépôt utilisées pour estimer le dépôt au sol à partir de la concentration intégrée dans l'air pouvait entraîner une surestimation des doses calculées.

Les évaluations de dose prenaient pour hypothèse que les habitants passaient deux tiers de leur temps à l'extérieur et un tiers à l'intérieur des habitations. Lorsque le panache arrivait au cours de la nuit, on considérait que la dose externe due au dépôt issu des retombées était négligeable pendant les six premières heures, parce les gens étaient à l'intérieur pendant la nuit. L'hypothèse que le fait de se trouver à l'intérieur des habitations fournit une protection proche de 100 % contre le rayonnement gamma émis par le dépôt des retombées sur le sol (et les autres surfaces) surestime probablement la capacité réelle de ces maisons tropicales légères à servir d'abri. Ceci entraîne une certaine sous-estimation des doses, quoique l'ampleur de cette sous-estimation ne soit probablement pas très importante (c'est-à-dire qu'elle ne dépasse pas 10 à 20 %).

La dose externe à long terme était calculée par intégration sur le temps, soit du débit de dose initialement mesuré dans l'air, soit du débit de dose efficace estimé à partir du dépôt sur le sol, en utilisant les facteurs de conversion de dose du Federal Guidance 12 de l'EPA. Une intégration sur la durée de six mois suffit pour évaluer une dose externe dans le cas de dépôt récent de produits de fission. On avait admis que le transport atmosphérique n'entraînait pas de modification dans le spectre des radionucléides déposés.

Les estimations de dose externe étant basées sur des mesures effectuées dans l'environnement qui variaient assez peu, en conséquence la valeur de la dose déduite peut être considérée comme la plus fiable de toutes celles obtenues par les procédures de reconstitution de dose réalisées ici. Cette estimation est raisonnablement conservatrice, du fait de la sélection des résultats de mesures les plus élevés parmi ceux disponibles.

5.1.3. Exposition interne

5.1.3.1. Inhalation du panache

La dose due à l'inhalation d'aérosols atmosphériques était évaluée à partir de l'activité volumique de l'air intégrée. Comme on ne disposait pas de séries temporelles de résultats de mesures de concentration dans l'air, l'activité volumique dans l'air intégrée sur le temps était généralement estimée à partir du dépôt présent sur le sol, en utilisant une vitesse de dépôt adaptée. Une seule vitesse de dépôt fut utilisée pour tous les radionucléides, sans tenir compte des variations dans le mode de dépôt des différents éléments et formes chimiques, comme il est brièvement expliqué dans l'appendice II. En règle générale, on utilisait une valeur de vitesse de dépôt inférieure à 10^{-2} m.s⁻¹ par temps sec, de 10^{-2} m.s⁻¹ par temps de pluie et de 10^{-1} m.s⁻¹ ou plus en cas de fortes pluies.

L'utilisation de la vitesse de dépôt comme base de la reconstitution de la dose due à l'inhalation est une source d'incertitude importante. Cela peut notamment entraîner une certaine surestimation de la dose à la thyroïde car l'iode et ses composés, dont les radioisotopes sont responsables de la dose à la thyroïde, sont caractérisés par une vitesse de dépôt supérieure à celle des autres radionucléides. Si une vitesse de dépôt moyenne est appliquée à tous les radionucléides, l'activité volumique intégrée de l'iode radioactif dans l'air peut être surestimée, de même que la dose à la thyroïde due à l'inhalation.

Dans la plupart des cas, cependant, la contribution de la dose due à l'inhalation à la dose efficace totale ou à la dose à la thyroïde n'est pas majeure. Toutefois, là où la consommation d'eau et d'aliments produits localement est faible, l'inhalation peut devenir la voie prédominante contribuant à la dose interne ou contribuant significativement à la dose totale.

La contribution des radionucléides remis en suspension à la dose due à l'inhalation n'a pas été prise en considération. Mais il est peu probable que la remise en suspension soit significative sur ces îles.

5.1.3.2. *Ingestion*

L'exposition interne par ingestion regroupe l'incorporation de radionucléides via l'eau de boisson, les produits agricoles et les produits de la mer. La contribution de ces trois composantes majeures à l'exposition par ingestion est spécifique à chaque site, dans la mesure où elle dépend beaucoup des conditions de vie locales (approvisionnement en eau et en nourriture, etc.), de même que des habitudes alimentaires des habitants.

Eau de boisson

Sur certains sites où l'eau potable provient de la récupération des eaux de pluie, l'ingestion d'eau peut être la cause principale des doses internes efficaces et des doses à la thyroïde. Après la plupart des essais, des données de la surveillance de l'eau de boisson étaient disponibles. Cependant, lorsque les concentrations initiales de radionucléides dans l'eau de boisson n'ont pas été mesurées, celles-ci étaient évaluées à partir des données provenant d'autres essais.

La dose interne a été estimée par intégration sur le temps de la concentration d'activité initiale dans l'eau de boisson sur une période allant jusqu'à un mois, ce qui est suffisant pour les radionucléides principaux contributeurs à la dose interne dont l'iode radioactif et quelques autres. Dans ce processus d'intégration, la dilution de l'eau contaminée par de l'eau non contaminée provenant des sources ou de la pluie n'a pas été prise en compte, ce qui pourrait entraîner une surestimation importante de la dose provenant de l'eau de boisson.

Dans la plupart des cas, les données concernant la surveillance de l'eau de boisson étaient présentées sous forme d'activité bêta total par litre. Pour évaluer la dose interne liée à la consommation d'eau, la composition isotopique des échantillons d'eau a été considérée comme identique à celle prédite théoriquement, corrigée de la décroissance radioactive au cours du temps. L'incertitude de cette évaluation est due à la modification de la distribution des radionucléides durant le transport dans l'atmosphère sur une longue distance et à la solubilisation des radionucléides dans l'eau. Des données spectrogammamétriques disponibles pour certains essais et sites ont confirmé que la distribution des radionucléides dans les échantillons d'eau était semblable à celle prédite. On peut donc considérer que cette hypothèse est une approximation sensée pour l'évaluation de la dose interne.

Produits agricoles

La consommation d'aliments issus de l'agriculture locale a contribué de manière significative à la dose efficace interne et à la dose à la thyroïde sur tous les sites considérés. Sur les petites îles, où il n'y a pas de bétail, la contamination directe des végétaux comestibles était la première voie d'exposition. On trouve du bétail à Tahiti, si bien que l'incorporation de radionucléides due à la consommation de lait, surtout chez les enfants, s'ajoutait à celle due à la consommation de végétaux. Là où le lait était présent comme voie de contamination, la consommation d'œufs et de viande n'avait qu'une importance mineure.

La composition isotopique des radionucléides contenus dans les aliments varie énormément. Alors que la composition isotopique des radionucléides déposés sur les plantes est généralement similaire à celle des retombées, les radionucléides qu'on retrouve dans les tissus

animaux et dans les produits comme le lait sont essentiellement des radionucléides solubles (isotopes de l'iode, césium, baryum, etc.). Les radionucléides insolubles sont éliminés par le métabolisme. Généralement, les radionucléides solubles ont des coefficients de dose par ingestion nettement plus élevés que les insolubles. C'est pourquoi, l'utilisation directe de l'activité bêta total des échantillons de produits animaux entraînerait une sous-estimation de la dose due à l'ingestion si on considère que la composition des radionucléides de l'activité bêta total dans les aliments d'origine animale est la même que celle constatée dans le dépôt initial des retombées. Cependant, des données propres à chaque radionucléide, en particulier l'activité volumique de l'iode radioactif dans le lait, ont été utilisées pour la reconstitution des doses chez les habitants de Tahiti, ce qui élimine la possibilité d'une sous-estimation importante.

Produits de la mer

La composition isotopique des radionucléides dans les poissons et les mollusques était considérée comme identique à celle observée dans les retombées. Les facteurs de transfert entre l'eau de mer et la chair des mollusques publiés sont en général faibles pour l'iode par rapport à beaucoup d'autres éléments, si bien qu'on pouvait s'attendre à ce que les d'activités bêta total utilisées comme base pour le calcul des doses entraînent une surévaluation des doses réelles, en particulier à la thyroïde. De même, les consommations de poissons et de mollusques retenues auraient tendance à surévaluer légèrement l'incorporation de radionucléides par les adultes et les enfants via les produits de la mer.

5.1.4. Anthropogammamétrie

Les quelques données disponibles concernant l'anthropogammamétrie des résidants locaux suite à certains essais nucléaires ont généralement confirmé que la démarche utilisée pour l'évaluation de la dose interne conduisait à une surévaluation.

5.2. Analyse de chacun des sites

Pour chaque site, les experts ont procédé à une analyse des estimations de dose relatives aux essais nucléaires concernés.

L'examen a porté essentiellement sur la nature des données utilisées comme références principales pour les analyses et sur les estimations effectuées pour les différentes voies d'exposition. Une évaluation des méthodes et des hypothèses concernant l'évaluation des doses a également été effectuée, comme il se doit.

L'examen s'est appuyé sur des documents en anglais, qui complétaient les informations disponibles dans l'ouvrage de référence [1], ainsi que sur des précisions apportées par les homologues français lors des discussions qui ont eu lieu au cours des réunions.

L'objectif de cet examen par les experts n'était pas de réaliser une nouvelle étude *in situ* détaillée ou un nouveau calcul des doses à partir des données présentées. Les conclusions de l'examen s'appuient sur l'idée que toutes les informations, tous les calculs et toutes les données fournis dans l'ouvrage de référence [1] et dans les rapports complémentaires sont correctes.

De précédentes reconstitutions de l'exposition du public aux retombées d'essais atmosphériques d'armes nucléaires menées sur d'autres sites dans les années 1950 (UNSCEAR, 2000 [9], Simon et Bouville, 2002 [10]) s'appuyaient généralement sur des

mesures d'activité bêta total des dépôts au sol effectuées à l'aide de collecteurs et d'estimations de dépôts basées sur des mesures de débit de dose gamma dans l'air. Les concentrations des différents radionucléides dans l'air, l'eau, le sol, la végétation et les aliments étaient principalement déduites grâce à des modèles mathématiques et à des valeurs admises (ou des distributions de valeurs) pour des coefficients des modèles ainsi que des estimations du moment d'arrivée des retombées. La reconstitution des doses en Polynésie française a eu l'avantage d'être effectuée à l'aide de mesures de concentrations d'activité dans l'eau, l'air et les aliments, et de mesures propres à chaque radionucléide pour le lait. Cependant, des questions demeurent concernant la portée des mesures ou leur pertinence pour les membres de la population exposée pris individuellement. Dans le cas où les évaluations de dose s'appuient sur la mesure d'un seul échantillon (Rigel/Tureia), l'incertitude associée est liée à la représentativité de ce dernier. Les résultats et les commentaires de l'examen de chaque cas sont présentés ci-dessous.

5.2.1. Essai/site : Rigel/Tureia

Donnée principale pour l'évaluation : dépôt au sol

Valeur : $5 \times 10^5 \text{ Bq.m}^{-2}$

Méthode d'estimation : estimée indirectement à partir de la concentration dans l'air de l'activité bêta [en Bq.s.m^{-3}] intégrée sur 24 heures, combinée avec une vitesse de dépôt de 10^{-1} m.s^{-1} et une mesure unique de la concentration dans l'eau de pluie (activité bêta total).

Commentaires : si l'activité du dépôt est entièrement constituée de dépôt sec, le choix de la vitesse de dépôt peut sembler biaisé pour les très grosses particules, ce qui peut conduire à surestimer le dépôt sec sur ce site. Cependant le dépôt est largement dépendant de la pluviosité. Ainsi, le degré d'incertitude dans l'estimation de l'activité totale du dépôt au sol est principalement fonction d'une mesure intégrée sur le temps de l'activité bêta dans l'air et d'une mesure unique de la concentration d'activité dans l'eau de pluie. Si presque tout le dépôt est dû aux précipitations (16 mm), avec une concentration de l'activité bêta de $2,59 \times 10^4 \text{ Bq.l}^{-1}$, l'activité du dépôt serait de $3,56 \times 10^5 \text{ Bq.m}^{-2}$, ce qui est comparable à l'estimation arrondie d'activité totale du dépôt, de $5 \times 10^5 \text{ Bq.m}^{-2}$.

Voies d'exposition pertinentes :

Inhalation :

Résultats : dose efficace chez l'adulte : 0,002 mSv, dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,03 mSv et dose efficace chez l'enfant : 0,0026 mSv.

Valeur de la concentration dans l'air : 11 Bq.m^{-3} (moyenne sur 24 heures) pour l'activité bêta total, alors qu'une valeur moyenne de 400 Bq.m^{-3} a été relevée sur une période de 3 heures et 20 minutes. Une activité intégrée de $9,5 \times 10^5 \text{ Bq.s.m}^{-3}$ a été utilisée pour calculer la concentration d'activité moyenne du panache (11 Bq.m^{-3} fois 86400 secondes).

Méthode d'estimation : la concentration de radionucléides spécifiques est déterminée par l'estimation de la distribution de radionucléides d'après la base de données JEFF [7] rapportée à la concentration d'activité bêta total au moment de l'arrêt des retombées. La dose inhalée a été estimée en supposant que les personnes avaient 100% d'activité à l'extérieur.

Commentaires : L'hypothèse d'une présence de 100% à l'extérieur est justifiée par l'heure d'arrivée du panache et le fait que les habitations n'offrent pas de véritable filtrage de l'air extérieur. La valeur moyenne de 11 Bq.m⁻³ dans l'air est considérée comme l'estimation la plus fiable de la concentration dans l'air car elle représente une mesure moyenne sur 24 heures. D'autres valeurs relevées, de l'ordre de 355 Bq.m⁻³, ne furent pas retenues pour l'évaluation de la dose parce qu'elles n'étaient représentatives que d'une très courte période de prélèvement.

Exposition externe due au panache :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : $1,4 \times 10^{-4}$ mSv.

Commentaires : la dose reçue due au panache est directement dépendante du choix de la valeur de la concentration dans l'air.

Exposition externe due au dépôt :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 0,051 mSv.

Commentaires : Valeur déduite en supposant que les personnes sont exposées à l'extérieur des habitations les deux tiers du temps et que l'intégration du débit de dose à 1m au dessus du sol est calculée sur une durée de six mois. Ces hypothèses sur l'exposition externe ont été appliquées en tous lieux. Ces résultats sont directement dépendants de la valeur retenue pour le dépôt au sol. Une durée d'intégration sur 6 mois est bien adaptée. L'hypothèse que les personnes sont totalement protégées du dépôt extérieur 8 heures par jour peut conduire à une légère sous-estimation des doses d'exposition externe.

Ingestion :

- Eau de boisson :

Résultats : dose efficace chez l'adulte : 0,01-0,02 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,52-0,88 mSv.

Commentaires : Il existe une grande marge d'incertitude concernant les composantes de la dose reçue due à l'ingestion d'eau. Elle provient de l'application pour cet essai et ce site d'une méthode empirique de déduction du taux de contamination relatif des eaux de pluie et de l'eau potable obtenu au cours des essais Arcturus et Encelade. Cependant, le taux de dilution due à la présence d'eau de pluie non contaminée dans les citernes avant l'arrivée des retombées est inconnu. Les ordres de grandeur des doses correspondent à ceux observés pour les retombées ultérieures.

- Produits de la mer :

Résultats : dose efficace chez l'adulte : 0,002-0,074 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,056-1,1 mSv.

Commentaires : Pour les produits de la mer, la dose est calculée en utilisant un coefficient empirique et discutable obtenu pour d'autres essais à partir d'une estimation de la dose due à la consommation de produits de la mer et le dépôt au sol. Il n'est pas possible de préciser dans quelle mesure ces coefficients sont applicables pour cet essai. Les doses à la thyroïde peuvent être surestimées car les retours d'expériences en d'autres lieux ont montré que les doses

reçues par ingestion de produits de la mer sont très rarement aussi élevées que des doses à la thyroïde dues à l'ingestion de lait (lorsqu'il est produit localement) ou d'eau de pluie. De plus, la supposition que tous les produits absorbés étaient au même niveau de concentration que celui affichant la plus forte concentration observée est susceptible de conduire à une surestimation des valeurs retenues.

5.2.2. Essai/site : Arcturus/Tureia

Donnée principale pour l'évaluation : dépôt au sol

Valeur : une radioactivité totale au sol de 16 MBq.m^{-2} au moment de l'arrêt des retombées.

Méthode d'estimation : Le dépôt au sol est déduit des résultats les plus élevés des mesures de débit de dose après correction de la décroissance radioactive. Ces estimations sont confortées par les valeurs d'activité bêta total relevées dans les collecteurs de retombées. Les estimations des dépôts, non corrigées de la décroissance, sont dérivées des résultats des mesures de débit de dose ambiant qui étaient de 1,3 à $4,45 \text{ MBq.m}^{-2}$ deux jours après la fin des retombées.

Commentaires : Les valeurs provenant des collecteurs de retombées variaient d'un facteur 10. L'utilisation des valeurs les plus élevées pour l'évaluation de l'activité locale aurait conduit à une surestimation de la concentration locale moyenne. On ne peut savoir à quel point ce fut effectivement le cas à cause du trop petit nombre d'échantillons utilisés.

Voies d'exposition pertinentes :

Inhalation :

Résultats : dose efficace chez l'adulte : 0,012 - 0,07 mSv, dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,2-1,4 mSv.

Commentaires : L'intervalle de valeurs utilisé dépend de la vitesse de dépôt retenue ($5 \times 10^{-2} - 3 \times 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$). La population est supposée être à l'extérieur au moment du passage du panache et n'était donc pas protégée par des bâtiments. Il est probable que l'intervalle de vitesses de dépôt utilisé est cohérent avec la valeur réelle de la concentration dans l'air car il a plu pendant les retombées de l'essai, ce qui justifie l'utilisation d'une valeur de vitesse de dépôt élevée.

Exposition externe due au panache :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : $1,7 \times 10^{-3} - 9,9 \times 10^{-3} \text{ mSv}$.

Commentaires : L'exposition externe due au panache est généralement une voie d'exposition mineure. Aucun effet de protection n'est pris en compte.

Exposition externe due au dépôt :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 0,7 mSv.

Commentaires : Il n'y a pas de signe de surévaluation ou de sous-évaluation des résultats.

Ingestion :

- Eau de boisson :

Résultats : dose efficace chez l'adulte 0,03 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 1,24 mSv.

Valeur de la concentration dans l'eau : Déduite de deux mesures d'activité bêta total dans les citernes.

Commentaires : Les radionucléides présents dans l'eau de boisson sont suppose les mêmes que ceux présents dans les retombées initiales. Ce peut être erroné pour les radionucléides les plus solubles qui restent en solution dans l'eau, alors que ceux liés aux particules insolubles ou ceux qui sont sous forme de cations tendent à se déposer ou se fixer sur les parois des citernes. Il pourrait y avoir une sous-estimation de la dose due à la consommation d'eau de boisson si l'activité mesurée porte principalement sur des radionucléides solubles comme les I-131 et les I-133, en supposant que ces radionucléides soient en présence de suffisamment d'iode stable pour ne pas se fixer sur les parois des citernes. Si les I-131 et les I-133 sont fixés sur les parois comme les autres radionucléides, la distribution supposée dans l'eau de boisson pourrait être représentative de l'exposition initiale. Les mesures d'activité bêta total et de radionucléides spécifiques dans l'eau potable après l'essai Encelade ne différeraient pas beaucoup de l'estimation attendue dans le dépôt initial. Ceci laisse penser que les radionucléides non solubles sont restés en majorité dans l'eau et ne se sont pas fixés sur les parois de la citerne. Les estimations de doses calculées peuvent être considérées comme des limites supérieures, car il n'a pas été tenu compte de la dilution produite dans les citernes par les pluies survenues dans les semaines qui ont suivi l'essai Encelade.

- Légumes :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,013 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,2 mSv.

Valeur de la concentration dans les légumes : Déduite d'une mesure sur les fruits de l'arbre à pain et d'une mesure sur des papayes, rapportées au régime alimentaire supposé des adultes et des enfants.

Commentaires : contribution mineure à la dose totale.

- Produits de la mer :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,03 mSv - 2,4 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,56 - 34,6 mSv.

Commentaires : Les valeurs basses sont obtenues à partir de mesures effectuées sur des fruits de mer prélevés au large. Les valeurs plus élevées proviennent des mesures sur les bénitiers géants pêchés dans le lagon peu profond. En tenant compte du fait que la littérature relative à la radioécologie précise que l'iode ne se concentre pas aisément dans les produits de la mer, l'hypothèse que la distribution des radionucléides dans ces produits est la même que celle du dépôt conduit à une surestimation de la dose à la thyroïde chez l'enfant. De plus, l'hypothèse que tous les aliments consommés contenaient la concentration la plus élevée (celle observée dans les bénitiers géants) conduit à une surestimation supplémentaire de la dose.

5.2.3. Essai/site : Encelade/Tureia

Donnée principale pour l'évaluation : Dépôt au sol

$$\text{Valeur : } 2,2 \times 10^7 \text{ Bq.m}^{-2}$$

Méthode de détermination : Cette valeur est la valeur maximale mesurée du dépôt total dans les collecteurs de retombées.

Commentaires : Il s'agissait d'un essai thermonucléaire. La puissance de l'explosion et la concentration de tritium peuvent être dignes d'intérêt. Le tritium produit au cours de l'essai est pris en compte dans les évaluations de dose. Les résultats le concernant ne sont pas présentés car sa contribution aux doses est mineure.

Voies d'exposition pertinentes :

Inhalation :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,004 – 0,024 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,14 – 0,82 mSv.

Valeur de la concentration dans l'air : La concentration dans l'air intégrée ($8 \times 10^3 - 5 \times 10^4$ Bq.m⁻³ en moyenne sur 2 heures et demie) a été estimée à partir du dépôt, en utilisant deux vitesses de dépôt (5×10^{-2} m.s⁻¹, 3×10^{-1} m.s⁻¹). Ces deux valeurs de la vitesse de dépôt sont relativement importantes car le temps était pluvieux.

Commentaires : Si ces valeurs de la vitesse de dépôt surévaluent les conditions réelles de dépôt en raison des conditions météorologiques (temps sec ou humide), la concentration dans l'air pourrait en revanche avoir été sous-évaluée. A l'inverse, des pluies ont eu lieu sur une période de 7 heures, ce qui implique que la vitesse de dépôt moyenne qui prévalait à ce moment là n'était probablement pas inférieure à 5×10^{-2} m.s⁻¹. Les évaluations de dose les plus élevées donnent une valeur limite maximale probable, même si on prend en compte le fait qu'on avait supposé que les habitants se trouvaient à l'intérieur, là où la concentration atmosphérique était moins importante.

Exposition externe due au panache :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : $1,3 \times 10^{-3} - 8 \times 10^{-3}$ mSv.

Commentaires : L'intervalle des estimations résulte de l'utilisation de deux vitesses de dépôt, divisées par le dépôt au sol estimé pour obtenir les concentrations dans l'air de chaque radionucléide.

Exposition externe due au dépôt :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 1,1 mSv.

Commentaires : Estimations basées sur le calcul du débit de dose dû au dépôt à 1 m au-dessus du sol. Les estimations s'appuient sur une intégration du débit de dose sur six mois et sur l'hypothèse que les personnes se trouvaient à l'extérieur 67 % du temps.

Ingestion :

- Eau de boisson :

Résultats: Dose efficace chez l'adulte: 0,06 – 0,46 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant: 3,0 – 21,1 mSv.

Commentaires: Ces valeurs reflètent les différentes mesures de concentration de la radioactivité bêta total dans deux citernes. Les valeurs correspondent à des estimations maximales, car il n'a pas été tenu compte de la dilution de l'eau des citernes par de l'eau de pluie non contaminée, tombée dans les jours suivant les retombées de l'essai. L'eau de boisson provenant des citernes est la première responsable de la dose à la thyroïde. Les doses les plus élevées ne seraient applicables qu'aux jeunes enfants buvant l'eau des citernes ayant la concentration d'activité bêta total initiale la plus élevée; par ailleurs, il n'a pas été tenu compte de la dilution de l'eau des citernes par l'eau de pluie tombée dans les semaines suivant l'essai.

- Légumes:

Résultats: Dose efficace chez l'adulte: 0,004 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant: 0,04 mSv.

Commentaires: Ces valeurs sont basées sur une seule mesure effectuée sur des papayes et une seule mesure effectuée sur les fruits de l'arbre à pain. La plus ou moins grande représentativité de ces mesures est un facteur d'incertitude supplémentaire dans l'estimation des doses, bien que la contribution des fruits à la dose totale due à l'ingestion soit faible.

- Viande:

Résultats: Dose efficace chez l'adulte: 0,0006 – 0,003 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant: 0,007 – 0,056 mSv.

Commentaires: Ces ordres de grandeur reflètent les mesures de l'activité bêta total dans la viande de poulet.

- Produits de la mer:

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,06 – 0,3 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,67 – 4,5 mSv.

Commentaires: Ces doses ont été calculées à partir des résultats de mesures effectuées sur des échantillons de bénitiers géants prélevés dans le lagon, comparés à ceux prélevés au-delà du récif (face au large). Les valeurs de dose à la thyroïde sont potentiellement très surévaluées chez les enfants, en raison de l'hypothèse portant sur l'ingestion journalière de chair de bénitier géant par les enfants, qui tend à maximiser l'exposition (c'est-à-dire, qui considère que la ration de produits de la mer est composée à 100 % de bénitier géant).

5.2.4. Essai/site: Aldébaran/ îles Gambier

Donnée principale pour l'évaluation : dépôt au sol

Valeurs : $5,9 \times 10^7$ Bq.m⁻²

Méthode de détermination : Cette valeur provient de la mesure du dépôt total dans un collecteur à Rikitea.

Voies d'exposition pertinentes :

Inhalation :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,12 – 1,2 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 3 – 30 mSv.

Valeur de la concentration dans l'air : Les valeurs de concentration dans l'air sont estimées à partir des mesures de dépôt, en utilisant deux valeurs de la vitesse de dépôt (10^{-2} – 10^{-1} m.s⁻¹).

Commentaires : Il n'y a aucun document faisant mention de pluies pendant le passage du panache. Les valeurs de la vitesse de dépôt peuvent être considérées comme élevées pour un dépôt sec, ce qui implique que la concentration dans l'air pourrait être sous-évaluée. Ce fait n'est pas négligeable, étant donné l'importance relativement grande de l'exposition par inhalation pour cet essai et sur ce site. Cependant, d'autres signes indiquent qu'une vitesse de dépôt de 10^{-2} est la valeur la plus raisonnablement correcte. Ces données supplémentaires sont les mesures d'activité de l'I-131 provenant d'anthropogammamétries et de mesures effectuées sur la thyroïde d'un veau, alors que la seule voie d'exposition était l'inhalation. Les mesures de concentration dans la thyroïde et donc de l'ingestion ont fourni des estimations de la concentration d'I-131 dans l'air pendant le passage du panache. Ces estimations correspondent bien à la concentration intégrée dans l'air calculée en utilisant la plus faible des deux vitesses de dépôt. En outre, des mesures directes de concentrations dans les végétaux ont donné des valeurs cohérentes, comparées avec celles calculées pour un facteur d'interception de 0,1 et une biomasse de légumes-feuilles de 1 kg.m⁻² pour le dépôt mesuré (voir ci-dessous). Les estimations de doses dues à l'inhalation retiennent l'hypothèse que les personnes sont 100 % à l'extérieur, sans abri.

Exposition externe due au panache :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 0,02 – 0,2 mSv.

L'intervalle des estimations de dose reflète la différence d'un facteur 10 entre les deux vitesses de dépôt.

Exposition externe due au dépôt :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 2,9 mSv.

Commentaires : Les estimations de dose sont calculées à partir des estimations de dépôt au sol, en faisant l'hypothèse que les personnes se trouvaient à l'extérieur 67 % du temps en moyenne sur une période de 6 mois.

Ingestion :

- Eau de boisson :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0 – 0,12 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0 – 6 mSv.

Commentaires : Des mesures effectuées le 8 juillet 1966 dans le réseau d'approvisionnement en eau potable de Rikitea ont été utilisées, corrigées de la décroissance, pour permettre d'estimer la contamination de l'eau de boisson immédiatement après le passage du panache. Une comparaison avec la concentration mesurée dans un échantillon prélevé dans une citerne le 6 juillet 1966 a montré que la concentration dans l'eau de la citerne était beaucoup plus faible à cette date que celle estimée par correction de la décroissance. Ceci indiquait qu'il n'y avait pas eu de transfert significatif par l'eau des particules radioactives déposées dans la citerne pendant plusieurs jours après l'arrivée des retombées. La méthode de calcul de la dose semble donc retenir les valeurs les plus élevées pour la consommation d'eau de citerne contaminée.

- Légumes :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,09 – 1,4 mSv ; dose à la thyroïde chez l'adulte : 1–14 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant: 1,3 – 19 mSv.

Valeur de la concentration dans les légumes : Aucune mesure sur des salades vertes n'a été utilisée. A la place, la concentration dans les légumes-feuilles a été estimée à partir du dépôt au sol, en prenant pour hypothèse une fraction d'interception de 0,1 et une biomasse de légumes-feuilles de 1 kg.m^{-2} , ce qui équivaut à $5,9 \times 10^6 \text{ Bq.kg}^{-1}$ de poids frais. Les concentrations mesurées étaient inférieures à la valeur calculée et l'écart entre les doses estimées reflète celui entre les concentrations calculées et les mesures les plus basses (i.e. radis).

Commentaires : Les estimations de dose les plus élevées semblent conservatives. Les diminutions de la radioactivité suite au processus de transformation des aliments brutes n'ont pas été prises en compte, mais il est peu probable que ces transformations réduisent les concentrations de plus d'un facteur de 2 à 3. La quantité journalière de légumes-feuilles frais consommée par les enfants, 15g/jour, semble correcte.

- Produits de la mer :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,001 – 0,8 mSv, dose à la thyroïde chez l'adulte : 0,01 – 8,6 mSv, dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,02 – 22,8 mSv.

Commentaires : Les mesures ont été effectuées sur plusieurs espèces d'organismes marins, la concentration la plus élevée ayant été relevée chez le bénitier géant : elle est supérieure aux autres mesures d'environ deux ordres de grandeur. Des mesures effectuées sur les parties comestibles des bénitiers géants après l'essai Phoebé indiquent que l'iode est passé dans la chair de ces organismes. Néanmoins, il est peu probable que les concentrations les plus élevées trouvées dans une seule mesure pour les bénitiers géants soient représentatives de la consommation totale de fruits de mer d'un individu donné. Si la dose à la thyroïde due aux fruits de mer a été largement surévaluée, la dose totale serait due essentiellement à l'inhalation.

5.2.5. Essai/site : Rigel/îles Gambier

Donnée principale pour l'évaluation : dépôt au sol

Valeur : $1,75 \times 10^5 \text{ Bq.m}^{-2}$

Méthode d'estimation : Le dépôt est estimé d'après les mesures de l'activité bêta total dans l'air et dans l'eau de pluie.

Valeur de la concentration dans l'air : La mesure de l'activité bêta total dans l'air établit une moyenne de $3,7 \text{ Bq.m}^{-3}$ sur 24 heures.

Commentaires : On a utilisé une seule valeur de vitesse de dépôt de 10^{-1} m.s^{-1} pour estimer le dépôt sec au sol. Cependant la majeure partie du dépôt était un dépôt humide et le dépôt sec ne contribue que faiblement au dépôt total, bien que la valeur retenue pour la vitesse de dépôt soit élevée. La quantité de dépôt humide est estimée à partir d'une seule mesure de concentration dans l'eau de pluie pour une pluviosité de 1,3 mm. L'incertitude sur l'estimation du dépôt au sol dépendrait de la validité de l'unique mesure de la concentration de l'activité bêta total dans l'eau de pluie.

Voies d'exposition pertinentes :

Inhalation :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : $7,1 \times 10^{-4} \text{ mSv}$; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,011 mSv.

Commentaires : Ces doses ont été calculées en supposant qu'il n'y avait aucune protection vis-à-vis du dépôt total et en utilisant une vitesse de dépôt unique de $0,1 \text{ ms}^{-1}$.

Exposition externe due au panache :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : $4,7 \times 10^{-5} \text{ mSv}$.

Exposition externe due au dépôt :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 0,019 mSv.

Commentaires : Dose estimée en supposant une exposition due à une présence 67 % du temps à l'extérieur sur une période de 6 mois.

Ingestion

- Eau de boisson :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,1 – 0,17 mSv ; dose à la thyroïde chez l'adulte : 1 – 1,7 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 4,4 – 7,3 mSv.

Commentaires : Les concentrations dans l'eau de boisson sont estimées d'après une mesure dans l'eau de pluie et l'utilisation d'un rapport empirique permettant de déduire la concentration dans l'eau de boisson à partir de celle mesurée dans l'eau de pluie (valeurs 12 et 20). Ce rapport empirique provient de deux mesures réalisées à Tureia après les essais Arcturus et Encelade. Le système de collecte et de distribution de l'eau à Rikitea était à même de gérer des volumes d'eau plus importants que ceux des citernes de Tureia, de telle sorte que la décroissance des radionucléides présents dans l'eau de boisson prélevée était généralement plus longue. En tenant compte également des faibles chutes de pluie à Mangareva, qui se sont produites principalement après le passage du panache de l'essai Rigel, on peut s'attendre à ce

que l'utilisation de ce rapport empirique conduise à une surestimation substantielle de la concentration effective dans l'eau de boisson.

- Légumes :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,012 mSv ; dose à la thyroïde chez l'adulte : 0,01 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,13 mSv

Commentaires : La concentration dans les légumes-feuilles est déduite d'un rendement de production estimé à 1 kg.m^{-2} et d'un taux d'interception de la concentration dans l'eau de pluie de 0,1. Ce taux d'interception peut être sous-estimé pour des conditions de très faible pluviosité (1,3 mm). La contamination par cette voie est très faible en comparaison de celle liée à la consommation d'eau de boisson contaminée.

- Produits de la mer :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,0006 – 0,0026 mSv ; dose à la thyroïde chez l'adulte : 0,0067 – 0,26 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,02-0,38 mSv.

Commentaires : Aucune mesure n'était disponible. Les concentrations de radionucléides spécifiques dans les aliments marins ont été déduites par application des relations empiriques entre les concentrations de radionucléides spécifiques mesurées pour d'autres essais dans les produits de la mer et l'activité bêta total due au dépôt. Cette façon de procéder est sujette à caution étant données les grandes variations constatées dans les conditions locales de dépôt, et la différence de dilution de ce dépôt entre les eaux de surface et les eaux profondes ainsi que les différences d'assimilation des radionucléides spécifiques dans les tissus comestibles des organismes marins. Il est souligné que des doses très différentes sont trouvées pour d'autres retombées d'essais en ce même lieu.

5.2.6. Essai/site : Phoebé/ îles Gambier

Donnée principale pour l'évaluation : dépôt au sol.

Valeur : $5,18 \times 10^6 \text{ Bq.m}^{-2}$

Méthode de détermination : L'estimation de cette valeur est basée sur une mesure unique utilisée pour Taku et Rikitéea.

Valeur de la concentration dans l'air : $1,5 \times 10^4 - 5,7 \times 10^4 \text{ Bq.m}^{-3}$ en moyenne pendant la durée du passage du nuage (soit trente minutes).

Commentaires : L'estimation obtenue en utilisant un seul résultat de mesure de dépôt et la question de la pertinence de ce résultat introduisent une incertitude sur la valeur moyenne du dépôt au sol utilisée. Les concentrations dans l'air sont des valeurs estimées, obtenues en divisant la valeur mesurée du dépôt au sol par les vitesses de dépôt de $5 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$. Ces concentrations dans l'air pourraient être sous-estimées si les vitesses de dépôt sont surestimées compte tenu des conditions locales de dépôt humide. En l'occurrence, la pluie est tombée pendant les 30 minutes de passage du panache. Pour l'inhalation, un facteur de protection estimé à 0,1 est appliqué compte tenu de l'utilisation d'abris d'urgence pour protéger la population pendant le passage du panache.

Voies d'exposition pertinentes :

Inhalation :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,0005 – 0,002 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,01 – 0,039 mSv.

Exposition externe due au panache :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 0,0005 – 0,002 mSv.

Commentaires : un facteur de protection de 0,5 est appliqué car les personnes présentes sur l'île étaient à l'intérieur des abris d'urgence pendant le passage du panache.

Exposition externe due au dépôt :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 0,11 mSv.

Ingestion :

- Eau de boisson :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,1 – 1,8 mSv ; dose à la thyroïde chez l'adulte : 1 – 19,4 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 4,3 – 88,2 mSv.

Commentaires : L' I-131 a été mesuré dans des échantillons d'eau de boisson provenant de 8 citernes différentes de Taku. La dose la plus élevée correspond au plus élevé des résultats des mesures effectuées à Taku et, la dose la plus basse, au plus faible résultat des mesures effectuées à Rikitea. Les échantillons d'eau de boisson à Rikitea proviennent du réseau de distribution d'eau potable. Il semble logique que les concentrations relevées dans ce réseau soient plus basses, à cause de la dilution dans l'eau non contaminée du réseau. Les valeurs retenues pour les échantillons de Taku sont des limites supérieures estimées sans tenir compte de la dilution dans les citernes avec l'eau de pluie tombée les 4 semaines qui ont suivi le test. Les doses les plus élevées ne pourraient être délivrées qu'à un adulte ou un enfant de Taku (population totale de quelques dizaines d'individus) qui n'aurait bu que l'eau de la citerne ayant la concentration la plus élevée.

- Légumes :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,025 – 0,64 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,34 – 9 mSv.

Commentaires : Ces estimations utilisent des résultats de mesures effectuées sur des légumes. Les extrêmes de l'intervalle sont associés aux résultats minimum et maximum utilisés. La seule consommation de légumes ayant l'activité la plus élevée est improbable, aussi les doses estimées sont des valeurs largement enveloppes.

- Produits de la mer :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,006 – 0,019 mSv ; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,18 – 0,58 mSv.

Méthode d'estimation : Ces valeurs sont basées sur l'utilisation des résultats de mesures effectuées sur des bénitiers et des turbos.

Commentaires : Les résultats des mesures effectuées portent sur l'activité bêta total et l'I-131, avec la prise en compte de la décroissance radioactive depuis l'instant initial du dépôt. En revanche, les processus d'élimination biologique et de délai d'assimilation biologique dans les organismes ne sont pas pris en compte. Un bénitier prélevé le 11 août 1971, soit trois jours après l'essai, a révélé une activité de 615 Bq.kg^{-1} d'I-131 et une activité bêta total de $1,73 \times 10^4 \text{ Bq.kg}^{-1}$. Ces résultats indiquent que l'I-131 participe pour 3,5% à l'activité bêta total, soit une proportion plus élevée qu'attendue compte tenu des valeurs relativement faibles publiées pour le taux de transfert de l'iode de l'eau vers les bénitiers. (Tableau 10, p.87, [2]). La représentativité de l'échantillonnage est un des facteurs d'incertitude. La consommation de bénitier par les jeunes enfants est sujette à caution. Il est probable que les doses à la thyroïde des enfants, estimées pour cette voie d'exposition soient surévaluées. D'autres essais ayant provoqué des retombées aux îles Gambier ont entraîné des contributions plus faibles à la dose totale. Il s'agit des essais Eridan et Toucan en 1970. A la suite de ces deux essais les débits de dose maximum enregistrés dans les îles Gambier ont été de moins de $1 \mu\text{Gy.h}^{-1}$, soit moins d'un cinquième de la dose enregistrée pour l'essai Phoebé.

5.2.7. Essai/site : Centaure/Pirae

Donnée principale pour l'évaluation : dépôt au sol.

$$\text{Valeur} : 3,3 \times 10^5 \text{ Bq.m}^{-2}$$

Méthode de détermination : Mesures directes à l'aide de collecteurs de retombées et spectrométries gamma réalisées sur des échantillons d'air.

Valeur de la concentration dans l'air : 1500 Bq.m^{-3} (moyenne sur 12 heures et demie, après estimation de la concentration dans l'air intégrée sur la durée du dépôt).

Commentaires : Des mesures sur différentes zones de Tahiti ont fait apparaître une grande hétérogénéité des dépôts, en raison des variations dans la topographie et les précipitations. Concentration dans l'air est estimée pour une vitesse de dépôt de $5 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$. L'incertitude dépend largement de la valeur de la vitesse de dépôt retenue. Pour des conditions atmosphériques sèches, la valeur choisie paraît appropriée, mais des valeurs de dépôt moins élevées qui seraient adaptées pour des distances plus éloignées du site d'essai pourraient être justifiées. Des valeurs de vitesse de dépôt moins élevées entraîneraient une augmentation de la concentration dans l'air. Dans tous les cas, l'inhalation est un contributeur mineur à la dose totale.

Voies d'exposition pertinentes :

***Inhalation* :**

Résultats : Dose efficace chez l'adulte: 0,046 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,57 mSv.

Commentaires : Dans l'hypothèse que les personnes se trouvaient à l'extérieur 100 % du temps.

Exposition externe due au panache :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 0,002 mSv.

Commentaires: L'incertitude sur ces estimations est fonction de la vitesse de dépôt retenue pour l'estimation des concentrations atmosphériques à partir des résultats des mesures de dépôt au sol.

Exposition externe due au dépôt :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 0,053 mSv.

Commentaires : L'hypothèse est faite que se trouver à l'intérieur d'un bâtiment offre une protection complète du dépôt au sol. Cette question est secondaire, mais cette hypothèse est une source potentielle de sous-estimation des doses chez les personnes vivant dans des constructions légères. L'exposition externe ne contribue pas de manière importante à la dose totale.

Ingestion :

- Lait :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte: 0,03 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant: 4,5 mSv.

Méthode de détermination : Les estimations de dose sont basées sur résultats des mesures de l'I-131 sur le lait.

Commentaires: Les échantillons de lait de vache provenaient du marché de Papeete. Des concentrations plus élevées ont été trouvées dans le lait fourni directement par les laiteries locales et les fermes. Il faut noter que le *Document n°13 du bureau de liaison français* [11], fourni dans le cadre de l'étude menée par l'AIEA en 1998, donne des informations quelque peu contradictoires. Il indique que les estimations de doses à la thyroïde chez l'enfant pour les résidents de Mahina en 1974 sont probablement irréalistes pour des populations qui ne consomment pas directement le lait provenant des troupeaux locaux. Mahina se trouve à environ 5 km de Pirae, mais le dépôt mesuré à cet endroit était 7,5 fois supérieur à celui mesuré à Pirae. Le Document n°13 précise que le lait local "était entièrement utilisé pour la production de fromage et de yaourt, pour lesquels le temps de maturation est de quelques semaines. La production locale ne couvre que 18 % de la consommation" [11]. Il est donc clair que, pour les enfants qui ne consomment que du lait en poudre, les doses à la thyroïde dues à l'ingestion de lait seraient ramenées à celles due à l'ingestion d'eau de boisson, en supposant que le lait en poudre est mélangé avec de l'eau de distribution avant d'être consommé.

- Eau de boisson :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,016 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,6 mSv.

Méthode de détermination : Les estimations de dose sont basées sur les résultats des mesures effectuées sur l'eau du robinet.

Commentaires : La consommation d'eau de la population de Pirae est supposée plus élevée que pour les autres sites. Dans des zones plus rurales, la consommation d'eau est complétée par celle d'eau de coco.

- Oeufs et Viandes (œufs, porc, boeuf, poulet) :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,046 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant: 1,28 mSv.

Méthode de détermination : Les doses sont calculées à partir des résultats des mesures de concentrations de radionucléides dans des échantillons d'œufs et de viande.

Commentaires : Il est rare que la dose à la thyroïde chez les enfants soit liée pour une fraction importante à la consommation de viande et d'œufs. La dose efficace chez les adultes et la dose à la thyroïde chez les enfants provenant des œufs et de la viande pourraient être surévaluées du fait de la démarche générale consistant à considérer les mesures d'activité les plus élevées comme représentatives de l'incorporation réelle.

- Légumes :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,15 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 4,3 mSv.

Méthode de détermination : Les calculs de dose sont basés sur des résultats de mesures effectuées sur divers types de légumes-feuilles, en retenant les valeurs maximales pour les estimations de dose. Un enfant est supposé consommer 30 g de légumes-feuilles par jour.

Commentaires : Il est rare que la consommation de légumes soit une voie d'exposition aussi importante que celle de lait pour la dose à la thyroïde chez les enfants. L'addition de plusieurs hypothèses faites pour estimer l'exposition des enfants via les légumes peut avoir conduit à une surévaluation de la dose.

- Produits de la mer :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,11 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 2,86 mSv.

Méthode de détermination : Un enfant de 1 à 2 ans est supposé consommer 100 g de poisson et 15 g de mollusques et de crustacés par jour.

Commentaires : Il semble que la consommation de produits de la mer par les enfants soit élevée. Les estimations de doses élevées contredisent les faibles concentrations mesurées dans les produits de la mer sur ce site. Les concentrations dans le poisson ont été déduites des mesures du Zr-95, pris comme indicateur de l'activité bêta totale. Le Zr-95 mesuré au niveau des filtres à air contribuait pour moins de 1 % à l'activité totale trouvée par analyse spectrale gamma, si bien que les estimations de l'activité bêta total basées sur des mesures de Zr-95 pourraient être sujettes à des surestimations assez importantes. L'activité du Zr-95 mesurée sur du poisson provenant du marché de Papeete le 25 juillet 1974 permettait de déduire une activité bêta total arrondie à 400 Bq.kg⁻¹. Les concentrations d'I-131 dans le poisson sont déduites des activités bêta total, en supposant que la répartition des radionucléides est la même que dans le dépôt issu des retombées. Si le coefficient de transfert de l'iode de l'eau de mer au poisson est nettement plus bas que pour le zirconium, comme indiqué dans le rapport TRS-422 [3], les concentrations d'I-131 pourraient être considérablement surévaluées.

5.2.8. Essai/site : Centaure/Hitiaa

Donnée principale pour l'évaluation : dépôt au sol

$$\text{Valeur : } 7,5 \times 10^6 \text{ Bq.m}^{-2}$$

Méthode de détermination : Mesures directes sur le dépôt au sol prélevé à l'aide de collecteurs de retombées.

Valeur de la concentration dans l'air : 16500 Bq.m⁻³, est la valeur estimée à partir du dépôt au sol, en moyenne sur les 12 heures et 30 minutes de passage du panache.

Commentaires : Il y a une grande hétérogénéité des dépôts selon les zones de prélèvement. La valeur du dépôt utilisée est le résultat de la mesure maximale.

Voies d'exposition pertinentes :

Inhalation :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte: 0,52 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant: 6,4 mSv.

Méthode de détermination : Les calculs de dose sont basés sur l'utilisation d'une concentration atmosphérique estimée à partir du dépôt au sol divisée par une vitesse de dépôt de 10⁻² m.s⁻¹, pour prendre en compte les pluies tombées au cours du passage du panache (1,4 mm). Il n'a pas plu sur toutes les zones.

Commentaires : L'hypothèse est posée que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant 100 % de la durée du passage du panache.

Exposition externe due au panache :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 0,025 mSv.

Commentaires : L'incertitude associée à cette estimation est liée au choix de la vitesse de dépôt utilisée pour déterminer la concentration dans l'air à partir du dépôt total.

Exposition externe due au dépôt :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 1,2 mSv.

Méthode d'estimation : Les estimations de dose sont faites à partir des résultats de mesure du dépôt au sol.

Commentaires : Une période d'intégration sur 6 mois, avec 33 % de protection liée au fait de se trouver à l'intérieur des habitations a été retenue. La protection fournie par les bâtiments est considérée comme étant de 100 %. Il n'y a pas d'indication concernant la pertinence du résultat de la mesure de dépôt en regard du dépôt réel auquel les personnes ont été exposées, mais on suppose que la valeur réelle de dépôt correspond au plus grand résultat de mesure. L'incertitude sur l'estimation de dose refléterait l'incertitude sur la représentativité de l'échantillon.

Ingestion :

- Lait :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte: 0,2 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 25 mSv.

Méthode de détermination : L'estimation de dose est basée sur les résultats de mesures de l'I-131 dans le lait produit localement.

Commentaires : La disponibilité de résultats de mesures d'I-131 dans le lait devrait permettre des estimations fiables de la dose à la thyroïde. Cependant, les estimations de dose ne sont applicables qu'aux personnes consommant du lait produit localement.

- Eau de boisson :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,03 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant: 1,3 mSv.

Méthode de détermination : L'estimation de dose est basée sur les résultats de mesures effectuées sur l'eau de boisson. L'activité bêta total est mesurée dans l'eau et la spectrométrie gamma est utilisée pour déterminer les concentrations d'iodes radioactifs.

Commentaires : L'eau de boisson était fournie par des citernes. L'estimation de dose est basée sur l'utilisation des résultats de mesures d'I-131 les plus élevés et corrigés de la décroissance radioactive.

- Œufs et viande :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,025 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,68 mSv.

Méthode de détermination : L'estimation de dose est principalement basée sur les résultats de mesures effectuées sur les œufs et la viande produits localement.

Commentaires : Les mesures sur les œufs et la viande correspondent davantage à ce qu'on aurait attendu, comparées aux mesures relatives à la contamination du lait. Le lait qui constitue une voie d'exposition est produit localement. A Pirae, le lait acheté au marché sur lequel ont été effectuées les mesures de concentrations, provenait peut-être d'un réseau de production laitière beaucoup plus large.

- Légumes :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,41 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 11,9 mSv.

Méthode de détermination : L'estimation de dose est basée sur les résultats de mesures effectuées sur des légumes-feuilles produits localement: salade verte, chou chinois, fafa, poireau, etc.

Commentaires : Les concentrations les plus élevées ont été utilisées pour estimer les doses. La dose due à la consommation de légumes semble élevée en comparaison de la dose due à la consommation de lait frais. C'est particulièrement le cas pour les enfants.

- Produits de la mer :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte: 0,18 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 3,4 mSv.

Méthode de détermination : L'estimation de dose est basée sur les résultats de mesures effectuées sur les produits de la mer locaux vendus au marché de Papeete car on ne disposait pas de résultats de mesures effectuées sur des poissons, crustacés et mollusques provenant d'Hitiaa. Ces produits viennent du lagon et de la pleine mer, au large de Papeete.

Commentaires : La consommation de poisson et de mollusques (100 g de poisson par jour et 35 g de mollusques et de crustacés par jour) semble beaucoup trop élevée pour de jeunes enfants (voir les commentaires sur l'ingestion de produits de la mer pour le site de Pirae). Les doses à la thyroïde dues à la consommation de produits de la mer peuvent donc avoir été largement surévaluées.

5.2.9. Essai/site : Centaure/Teahupoo, Taravao

Donnée principale pour l'évaluation : dépôt au sol

Valeur : $2,75 \times 10^7$ Bq.m⁻²

Méthode de détermination : Estimation maximale faite à partir de mesures sur le dépôt total.

Commentaires : Cette valeur représente la valeur maximale trouvée parmi plusieurs collecteurs de retombées.

Valeur de la concentration dans l'air : 60 000 Bq.m⁻³ en moyenne sur 12 heures 30 minutes.

Commentaires : Une vitesse de dépôt de 10⁻² m.s⁻¹ a été utilisée pour évaluer la concentration dans l'air à partir du dépôt mesuré. La valeur de la vitesse de dépôt choisie a été fixée en tenant compte de la pluie, mais elle semble trop faible pour des pluies abondantes. Une plus grande valeur impliquerait une concentration dans l'air inférieure et une dose due à l'inhalation moins élevée.

Voies d'exposition pertinentes :

Inhalation :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte: 1,9 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant: 24 mSv.

Méthode de détermination : L'estimation de dose est basée sur les résultats de mesures effectuées sur le dépôt. On suppose que les personnes n'étaient pas abritées au moment du passage du panache avec 100 % de leur activité en extérieur.

Commentaires : L'incertitude sur la dose estimée dépend fortement de la valeur de la vitesse de dépôt choisie et du degré de représentativité de la mesure du dépôt au sol par rapport à la moyenne réelle de la zone. En cas de dépôt humide, la vitesse de dépôt choisie pourrait être trop faible, ce qui impliquerait une surévaluation de la concentration dans l'air et donc de la dose due à l'inhalation. La période d'inhalation correspond à la durée totale du passage du panache, soit 12 heures et 30 minutes. Le scénario d'exposition pour les enfants suppose cependant une présence de 12 heures et 30 minutes à Taravao. Cette hypothèse a été choisie pour garantir que la dose ne serait pas sous-évaluée. Si les jeunes enfants n'étaient présents

que 4 heures pendant le passage du panache, la dose à la thyroïde reçue à Taravao serait inférieure d'environ 8 mSv, à quoi il faudrait ajouter la dose reçue ailleurs, qui s'élèverait à environ 4,2 mSv (à Hitiaa), ce qui donne un total d'environ 12 mSv.

Exposition externe due au panache :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 0,09 mSv.

Méthode de détermination : L'estimation de dose est basée sur les résultats de mesures effectuées sur le dépôt et sur l'estimation de la concentration dans l'air à partir du dépôt avec une vitesse de dépôt de 10^{-2} m.s⁻¹.

Commentaires : L'incertitude sur l'estimation des doses dépend de la pertinence de la mesure du dépôt et de l'utilisation de la vitesse de dépôt pour évaluer la concentration moyenne dans l'air dans cette zone. Les doses sont calculées en supposant que les personnes étaient présentes pendant toute la durée du passage du panache, sans être abritées.

Exposition externe due au dépôt :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte et l'enfant : 1,1 mSv.

Méthode de détermination : L'estimation de dose est basée sur les résultats de mesures effectuées sur le dépôt au sol, en supposant que les personnes n'étaient présentes que 4 heures par jour (ouvriers agricoles saisonniers).

Commentaires : Pour connaître l'exposition externe totale, il faudrait ajouter l'exposition pendant 20 à 24 heures par jour sur le lieu de résidence. Les valeurs retenues pour la dose externe due au dépôt au sol sont donc largement sous-évaluées pour cette voie d'exposition, même si sa contribution à la dose à la thyroïde n'est pas importante.

Ingestion :

- Eau de boisson :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,0045 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,22 mSv.

Commentaires : L'eau de boisson provient des citernes.

- Lait :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,03 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 4,5 mSv.

Commentaires : Les résultats de mesures utilisés pour Pirae sont reprises directement pour ce calcul des doses. Voir les commentaires pour Pirae.

- Œufs et Viandes :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,025 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 0,61 mSv.

Méthode de détermination : L'estimation de dose est basée sur les résultats de mesures effectuées sur des œufs produits à Teahupoo et de la viande vendue à Pirae.

Commentaires: La contribution de la viande et des œufs à la dose est mineure.

- Légumes :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte: 0,23 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 6,9 mSv.

Méthode de détermination : L'estimation de dose est basée sur les résultats de mesures effectuées sur des légumes-feuilles cultivés à Teahupoo.

- Produits de la mer :

Résultats : Dose efficace chez l'adulte : 0,18 mSv; dose à la thyroïde chez l'enfant : 3,4 mSv.

Méthode de détermination : L'estimation de dose est basée sur les mêmes résultats de mesures que celles effectuées à Hitiaa.

Commentaires : Voir les commentaires pour Hitiaa.

5.3. Synthèse des analyses des doses efficaces chez l'adulte et des doses à la thyroïde chez l'enfant

Les estimations de dose efficace chez l'adulte et de dose à la thyroïde chez l'enfant (1 à 2 ans), de même que la contribution de chaque voie d'exposition à celle-ci sont présentées dans les tableaux 3 et 4. En plus des données présentées dans les tableaux 1 et 2, les tableaux 3 et 4 indiquent la contribution des aliments composant le régime alimentaire habituel. Pour chaque test, les voies d'exposition principales apparaissent en gras.

Les doses à la thyroïde estimées pour les adultes sont en général de 2 à 4 fois inférieures à celles estimées pour les jeunes enfants et sont sujettes aux mêmes incertitudes que celles estimées pour les enfants. Dans ces tableaux, toutes les composantes de l'exposition sont additionnées.

Tableau 3. Estimations de dose efficace chez l'adulte (mSv).

| | Inhalation pendant le passage du panache | Dose externe due au panache | Dose externe due au dépôt au sol | Légumes | Lait | Viande, etc. | Produits de la mer | Eau | TOTAL |
|------------------------|--|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------|
| Rigel-Tureia | 0,002 | négligeable | 0,05 | Absence de données | Absence de données | Absence de données | 0,002-0,074 | 0,01-0,02 | 0,07-0,15 |
| Arcturus-Tureia | 0,012-0,07 | 0,002-0,01 | 0,7 | 0,013 | Absence de données | Absence de données | 0,03-2,4 | 0,03 | 0,8-3,2 |
| Encelade-Tureia | 0,004-0,024 | négligeable | 1,1 | 0,004 | Absence de données | négligeable | 0,06-0,3 | 0,06-0,45 | 1,2-1,9 |
| Aldébaran-îles Gambier | 0,12 1,2 | 0,02 0,2 | 2,9 | 0,09 1,4 | Absence de données | Absence de données | 0,001 0,8 | 0 0,12 | 3,1 6,6 |
| Rigel-îles Gambier | négligeable | négligeable | 0,019 | 0,012 | Absence de données | Absence de données | 0,0006-0,026 | 0,1-0,17 | 0,1-0,2 |
| Phocé-îles Gambier | 0,0005-0,002 | 0,0005-0,002 | 0,11 | 0,025-0,64 | Absence de données | Absence de données | 0,006-0,019 | 0,1-1,8 | 0,24-2,6 |
| Centaure-Pirae - Hifia | 0,046 | 0,002 | 0,053 | 0,15 | 0,03 | 0,046 | 0,11 | 0,016 | 0,5 |
| - Taravao | 0,52 | 0,025 | 1,2 | 0,41 | 0,2 | 0,025 | 0,18 | 0,03 | 2,6 |
| | 1,9 | 0,09 | 1,1 | 0,23 | 0,03 | 0,025 | 0,18 | 0,0045 | 3,6 |

Tableau 4. Estimations de dose à la thyroïde chez l'enfant (1 à 2 ans) (mSv).

| | Inhalation pendant le passage du panache | Dose externe due au panache | Dose externe due au dépôt au sol | Légumes | Lait | Viande, etc | Produits de la mer | Eau | TOTAL |
|------------------------|--|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|----------|
| Rigel-Tureia | 0,03 | négligeable | 0,05 | Absence de données | Absence de données | Absence de données | 0,056-1,1 | 0,52-0,88 | 0,65-2,1 |
| Arcturus-Tureia | 0,2-1,4 | négligeable | 0,7 | 0,2-0,22 | Absence de données | Absence de données | 0,56-34,6 | 1,24 | 2,2-38 |
| Encelade-Tureia | 0,14 0,82 | négligeable | 1,1 | 0,04 | Absence de données | 0,007 0,056 | 0,67 4,5 | 3,0-21,1 | 4,9 27,6 |
| Aldébaran-îles Gambier | 3-30 | 0,02-0,2 | 2,9 | 1,3-19 | Absence de données | Absence de données | 0,02-22,8 | 0,0-6,0 | 7,2-81 |
| Rigel-îles Gambier | 0,011 | négligeable | 0,019 | 0,13 | Absence de données | Absence de données | 0,02-0,38 | 4,4-7,3 | 4,6-7,8 |
| Phocé-îles Gambier | 0,01 0,039 | négligeable | 0,11 | 0,34 9 | Absence de données | Absence de données | 0,18 0,58 | 4,3-88,2 | 4,8 98 |
| Centaure-Pirae | 0,57 | 0,002 | 0,053 | 4,3 | 4,5 | 1,28 | 2,86 | 0,6 | 14 |
| - Hifia | 6,4 | 0,025 | 1,2 | 11,9 | 25 | 0,68 | 3,4 | 1,3 | 50 |
| - Taravao | 24 | 0,09 | 1,1 | 6,9 | 4,5 | 0,61 | 3,4 | 0,22 | 41 |

6. CONCLUSIONS

- (1) Le processus de reconstitution des doses pour la population de Polynésie française exposée aux rayonnements dus aux retombées radioactives des essais nucléaires atmosphériques français effectués entre 1966 et 1974 s'appuie sur un grand nombre de mesures de la radioactivité dans l'environnement qui généralement caractérisent les conditions passées d'exposition aux rayonnements.
- (2) La reconstitution des doses concerne les principales voies d'exposition humaines pertinentes pour l'exposition du public aux retombées radioactives en Polynésie française, à savoir:
 - l'exposition externe aux dépôts au sol associés aux retombées suite au passage du panache;
 - l'exposition externe liée à l'immersion dans le panache;
 - l'exposition interne liée à l'inhalation de radionucléides dans le panache;
 - l'exposition interne liée à l'ingestion d'aliments, et
 - l'exposition interne liée à l'ingestion d'eau, de lait et d'autres liquides.
- (3) Les doses efficaces et les doses à la thyroïde estimées chez les adultes et les enfants sont les principales grandeurs radiologiques pertinentes à associer aux effets potentiels sur la santé de la population de Polynésie française.
- (4) Les estimations de doses trouvées pour les adultes sont bien inférieures aux valeurs qui dans d'autres situations ont conduit à des effets sur la santé statistiquement observables. L'exposition due aux retombées vient s'ajouter à l'exposition liée aux sources de radioactivité naturelles; cependant, les doses efficaces aux adultes dues aux retombées sont du même ordre que celles reçues chaque année dues aux rayonnements naturels ambiants en Polynésie française (1–3 mSv/an)⁴. Les doses aux organes les plus importantes sont celles à la thyroïde, en particulier chez les enfants dans la tranche d'âge de 1 à 2 ans, chez qui on observe des doses maximales pour la plupart des voies d'exposition⁵.
- (5) Des mesures de dépôt au sol, de débit de dose et/ou de concentration dans l'air sont généralement utilisées comme point de départ pour la reconstitution des doses pour plusieurs voies d'exposition si on ne dispose pas de mesures spécifiques dans des milieux particuliers pour chaque essai et chaque site. Toutefois, si des mesures spécifiques (aliments, eau de boisson, etc.) sont disponibles, elles sont utilisées directement pour l'évaluation de la contribution à la dose totale de chaque voie d'exposition pertinente.
- (6) L'approche retenue pour estimer les doses a été de retenir les résultats de mesure les plus élevés ou de faire des hypothèses relativement conservatives, c'est-à-dire de retenir toujours les limites supérieures dans les estimations de doses. Ceci implique que l'exposition réelle est probablement inférieure à celle calculée dans l'ouvrage de

⁴ L'intervalle des doses aux populations habituellement observées dans le monde en raison du rayonnement ambiant est de 1 à 10 mSv/an [9].

⁵ L'examen par des experts a accordé une attention particulière aux estimations de dose à la thyroïde chez les enfants car une augmentation de cancers de la thyroïde chez les enfants a été observée dans d'autres situations d'exposition impliquant la dispersion d'iode radioactif (Tchernobyl en 1986 et les îles Marshall en 1954).

référence [1]. En ce qui concerne la dose interne, on a pu constater dans certains cas qu'elle est conservative car les mesures anthropogammamétriques de contrôle fournissent des doses bien inférieures à celles estimées par modélisation.

- (7) Le tableau 5 présente de manière synthétique les incertitudes associées aux doses efficaces chez les adultes et le tableau 6, celles associées aux doses à la thyroïde chez les enfants pour les différents essais et sites concernés.

Tableau 5. Incertitudes sur les évaluations de doses efficaces chez l'adulte.

| Essai/site | Doses efficaces estimées (mSv) | COMMENTAIRE | Indication du degré d'incertitude* |
|-------------------------------|--------------------------------|---|------------------------------------|
| Rigel/Tureia | 0,07–0,15 | Les évaluations de dose les plus élevées proviennent des produits de la mer. Valeurs incertaines, mais la valeur la plus élevée résulte probablement d'une surévaluation. | + |
| Arcturus/Tureia | 0,8–3,2 | Les évaluations de dose les plus élevées proviennent des produits de la mer, en considérant que tous les produits ingérés présentaient la concentration la plus élevée. Les estimations les plus hautes ne seraient applicables qu'aux personnes dont la consommation de produits de la mer se composerait exclusivement de bénéficiers provenant du lagon. | + |
| Encelade/Tureia/ | 1,2–1,9 | Le principal facteur expliquant la valeur de la dose est l'exposition externe aux rayonnements dus au dépôt, dose estimée sur la base des résultats de mesures de dépôt les plus élevés. | 0 |
| Aldébaran/îles Gambier | 3,1–6,6 | Le principal facteur expliquant la valeur de la dose est l'exposition externe aux rayonnements dus au dépôt, dose estimée sur la base des résultats de mesures de dépôt les plus élevés.. | 0 |
| Rigel/îles Gambier | 0,1–0,2 | Le principal facteur expliquant la valeur de la dose est l'eau de boisson, dose estimée à partir des résultats de mesures de concentration maximum. | + |
| Phobé/îles Gambier | 0,24–2,6 | Le principal facteur expliquant la valeur de la dose est l'eau de boisson, dose estimée à partir de la concentration maximale mesurée dans une seule citerne à Taku. Les doses aux résidents de Rikitea sont au moins trois fois inférieures. | + |
| Centaure/Pirae | 0,5 | La principale voie d'exposition est l'ingestion de légumes et de produits de la mer. Les évaluations de dose due aux produits de la mer sont en contradiction avec les faibles concentrations mesurées dans ces produits. | 0 |
| Centaure/Hitiaa | 2,6 | La composante principale est l'exposition externe, évaluée d'après la mesure la plus élevée effectuée sur le dépôt. On aurait pu s'attendre à ce que les doses moyennes soient plus faibles. | 0 |
| Centaure/Taravao | 3,6 | La vitesse de dépôt utilisée pour déterminer la concentration intégrée dans l'air semble trop faible en cas de fortes pluies. Une valeur plus élevée impliquerait une dose due à l'inhalation plus faible, laquelle est la composante principale de la dose efficace. | 0 |

* Il est impossible de fournir une analyse chiffrée du degré d'incertitude des estimations de dose en raison de l'absence de mesures directes de radionucléides spécifiques dans tous les milieux et pour tous les essais et tous les sites. Cependant, il est peu probable que les valeurs maximales estimées pour les doses efficaces chez l'adulte sous-évaluent les doses effectivement reçues, du fait du choix systématique des quantités maximales mesurées comme base pour les estimations. En tenant compte des informations sur les mesures obtenues pour chaque essai et de la méthode de calcul des doses, une évaluation semi-chiffrée du degré probable de surévaluation a été effectuée pour les valeurs maximales calculées pour chaque essai et chaque site. Une évaluation indicative est donnée dans la colonne de droite du tableau 5 : 0 indique que la dose est probablement correctement évaluée, + que la dose est surévaluée plus de deux fois et ++ que la dose est surévaluée plus de 5 fois.

Tableau 6. Incertitudes sur les évaluations des doses à la thyroïde chez les enfants (de 1 à 2 ans).

| | Doses totales estimées (mSv) | COMMENTAIRE | Indication du degré d'incertitude* |
|-------------------------------|------------------------------|--|------------------------------------|
| Rigel-Tureia | 0,65–2,1 | Les évaluations de dose les plus élevées proviennent de l'eau de boisson et des produits de la mer. Valeurs incertaines, mais la valeur la plus forte résulte probablement d'une surévaluation. | + |
| Arcturus-Tureia | 2,2–38 | L'évaluation de dose la plus élevée est celle relative aux enfants de 1 à 2 ans dont la consommation de produits de la mer se compose uniquement de bénéitiers du lagon. Une surévaluation de plusieurs facteurs est probable. | ++ |
| Encelade-Tureia | 4,9–27,6 | Les évaluations les plus hautes proviennent de l'eau de boisson et ne s'appliquent qu'aux utilisateurs d'une citerne particulière. Les valeurs sont surévaluées dans la mesure où il n'est pas tenu compte de la dilution de l'eau de la citerne par de l'eau de pluie non contaminée. | + |
| Aldébaran-îles Gambier | 7,2–81 | La dose à la thyroïde liée à l'ingestion de produits de la mer est probablement surestimée de plusieurs facteurs. La dose due à l'inhalation (jusqu'à 30 mSv) serait alors la composante principale. Les doses à la thyroïde dues à l'inhalation chez les adultes, estimées d'après l'anthropogammamétrie, d'environ 0,3 – 3 mSv, comparées à la valeur calculée d'après le dépôt (1,3 – 13 mSv) pourraient donner une indication sur le degré de surévaluation dans les estimations de doses dues à l'inhalation. Les concentrations mesurées dans les végétaux à feuilles montrent que les concentrations calculées pour ces mêmes végétaux, et donc les doses dues à leur ingestion, sont également surévaluées. | ++ |
| Rigel-îles Gambier | 4,6–7,8 | Il est probable que la dose à la thyroïde due à l'eau de boisson (voie d'exposition principale) soit largement surestimée. | ++ |
| Phoebé-îles Gambier | 4,8–98 | Pour le village de Taku (population de quelques dizaines de personnes) l'eau de boisson est la voie d'exposition principale. Les doses estimées les plus élevées ne s'appliquent qu'aux utilisateurs d'une seule citerne et sont basées sur l'hypothèse qu'un enfant de 1 à 2 ans appartient à ce groupe. Les valeurs sont surévaluées puisqu'il n'est pas tenu compte de la dilution de l'eau de la citerne par l'eau de pluie non contaminée. Les doses les plus élevées chez les enfants de Rikitea sont plus de dix fois inférieures. | + +++ |
| Centaure-Pirae | 14 | Les doses semblent être surévaluées et pourraient l'être beaucoup plus pour l'ingestion de produits de la mer. | + |
| Centaure-Hitiaa | 50 | Il y a une probable surévaluation des doses chez les enfants pour les voies d'exposition suivantes: viandes, légumes, produits de la mer et eau. La dose évaluée pour l'ingestion de lait (25 mSv) chez les enfants buvant du lait produit localement est plus solide. | 0 |
| Centaure-Taravao | 41 | Des incertitudes persistent quant au nombre de personnes habitant la zone de Taravao. Les doses externes dues au dépôt présentées dans le tableau doivent être ajustées pour les habitations éloignées de Taravao, mais ces modifications affectent peu les doses totales. La vitesse de dépôt retenue pourrait être trop faible pour un dépôt humide, ce qui implique une éventuelle surévaluation importante de la concentration dans l'air et donc de la dose due à l'inhalation. La période retenue pour l'inhalation est la durée totale de passage du panache, soit 12 heures et 30 minutes. Si toutefois les jeunes enfants n'étaient présents que pendant quatre heures durant le passage du panache, la part de la dose à la thyroïde chez l'enfant due à l'inhalation serait divisée par deux. | 0 |

* Il est impossible de fournir une analyse chiffrée du degré d'incertitude des estimations de dose en raison de l'absence de mesures directes de radionucléides spécifiques dans tous les milieux et pour tous les essais et tous les sites. Cependant, il est peu probable que les valeurs maximales estimées pour les doses à la thyroïde sous-évaluent les doses effectivement reçues, du fait du choix systématique des quantités maximales mesurées comme base pour les estimations. En tenant compte des informations sur les mesures obtenues pour chaque essai et de la méthode de calcul des doses, une évaluation semi-chiffrée du degré probable de surévaluation a été effectuée pour les valeurs maximales calculées pour chaque essai et chaque site. Une évaluation indicative est donnée dans la colonne de droite du tableau 6 : 0 indique que la dose est probablement correctement évaluée, + que la dose est surévaluée plus de deux fois, ++ que la dose est surévaluée plus de 5 fois et +++ qu'elle est surévaluée plus de 10 fois.

RÉFÉRENCES

- [1] MINISTERE DE LA DEFENSE, La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie, (2006) (en français).
- [2] COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE, Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique, Publication de la CIPR n°103, Pergamon Press, Oxford et New York (2007).
- [3] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE, Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in the Marine Environment, Collection Rapports techniques n° 422, AIEA, Vienne (2004).
- [4] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE, Handbook of Parapeter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Collection Rapports techniques n° 472, AIEA, Vienne (2010).
- [5] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE, The Radiological Situation at the Atolls of Mururoa and Fangataufa, Collection Rapports d'évaluation radiologique, AIEA, Vienne (1998).
- [6] DROZDOVITCH, V., BOUVILLE, A., DOYON, F., BRINDEL, P., CARDIS, E., DE VATHAIRE, F., Reconstruction of individual radiation doses for a case-control study of thyroid cancer in French Polynesia, Health Physics, 94 (5) (2008), 421–433.
- [7] AGENCE DE L'ENERGIE NUCLEAIRE, Joint Evaluated Fission and Fusion (JEFF) project database.
- [8] ECKERMAN, K.F., RYMAN, J.C., Agence de protection de l'environnement des Etats-Unis, Federal Guidance 12, External exposure to radionuclides in air, water and soil. Federal guidance report 12-EPA 402-R-93-081 (1993).
- [9] NATIONS UNIES, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), ONU, New York (2000).
- [10] SIMON, S. L., BOUVILLE, A., Radiation doses to local populations near nuclear weapons test sites worldwide, Health Physics, 82 (2002) 706–725.
- [11] MINISTERE DE LA DEFENSE, DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES ET COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, DIRECTION DES APPLICATIONS MILITAIRES, Radiological Consequences of the Atmospheric Tests on the Islands of French Polynesia from 1966 to 1994, Document n° 13 du Bureau de liaison français (1997).

APPENDICE I. DOCUMENTS D'APPUI

I.1. Le livre *La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie* Chapitre III: Matériels et méthode de la surveillance radiologique

L'approche adoptée dès 1966 par les expérimentateurs du CEP pour la protection de l'Homme et de l'environnement a consisté à modifier les modalités des essais afin de réduire les retombées sur les atolls polynésiens (cf. Chapitre II). Elle a été confortée dans les années 1970, par les recommandations édictées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). À cette date, la CIPR avait conclu que comme la protection de l'Homme contre les rayonnements avait pour objectif de maintenir le risque d'exposition pour les personnes à un niveau très faible, cela devait maintenir les niveaux de rayonnements dans l'environnement suffisamment bas pour que les autres espèces tant végétales qu'animales soient toujours protégées. Cette conclusion était formulée au paragraphe 14 de la Publication 26 (CIPR, 1977) : *«Bien que le principal objectif de la protection contre les rayonnements soit la mise en œuvre et le maintien de conditions de sécurité appropriées pour les activités impliquant une exposition de l'Homme, il est probable que le niveau de sécurité nécessaire pour assurer la protection de tous les individus du genre humain convient également pour protéger les autres espèces, sinon nécessairement tous les individus de ces espèces. La Commission pense donc que si l'Homme est protégé de manière adéquate, d'autres êtres vivants sont aussi susceptibles d'être suffisamment protégés».*

Au fil des ans, la CIPR a produit un grand nombre de recommandations au sujet de divers aspects de la protection radiologique de l'être humain qui ont été transposées en droit européen et français et donc appliquées au CEP, en particulier celles qui traitent de la surveillance et du contrôle radiologiques. Aujourd'hui, les principes de base des recommandations de la CIPR ne traitent toujours pas spécifiquement de la protection de l'environnement. La position actuelle, comme celle du passé, est exposée au paragraphe 16 de la Publication 60 (CIPR, 1991) : *«La Commission pense que le niveau de maîtrise de l'environnement nécessaire pour protéger l'Homme à un degré estimé aujourd'hui comme valable permettra aux autres espèces de ne pas être en danger [...] Pour le moment, la Commission ne s'intéresse à l'environnement qu'en tant que vecteur des radionucléides vers l'Homme, puisque ceci affecte directement la protection radiologique des êtres humains».*

La protection de l'Homme étant l'objectif primordial, ce chapitre décrit l'organisation pratique de la surveillance radiologique des atolls d'expérimentations pour assurer la protection des travailleurs et celle des populations vivant sur le territoire polynésien. Les indicateurs associés à la localisation des îles et atolls surveillés, ainsi que les méthodes de prélèvement des échantillons et les protocoles de mesures des radionucléides utilisés sont également présentés.

III.1 - LABORATOIRES DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

À la suite d'une première mission d'exploration en 1962, une station de prélèvement a été installée à Faaa, à proximité de Papeete, sur l'île de Tahiti, afin de surveiller les niveaux d'activité des radionucléides d'origines naturelle et artificielle en Polynésie française, et d'en analyser les variations après les essais des autres puissances nucléaires. En effet, entre 1946 et 1968, les États-Unis avaient réalisé 213 essais, dont 22 supérieures à une mégatonne, dans plusieurs atolls de Micronésie, comme Bikini, dans le Pacifique Nord. Pour sa part, le Royaume-Uni avait effectué 12 essais atmosphériques dans le Pacifique Sud, en Australie, entre 1952 et 1957.

Dès le milieu des années 1960, avec la création d'un laboratoire et de deux services de surveillance et de contrôle regroupant du personnel du CEA et du ministère de la Défense, un dispositif complet de surveillance radiologique de la Polynésie française était en place (cf. Annexe 4).

Basé initialement à Faaa, le Laboratoire de surveillance radiologique (LSR) exécutait toutes les analyses nécessaires à la surveillance radiologique de la Polynésie. Il était également responsable de l'édition d'un rapport sur la radioactivité du territoire polynésien comprenant de très nombreux résultats de mesures réalisées sur les différentes composantes de l'environnement de Polynésie. Chaque année depuis 1966, ce rapport est adressé au comité scientifique sur les effets des radiations atomiques des Nations Unies (*Unscear*). Par la suite, basé à Mahina, le LSR est devenu le Laboratoire d'étude et de surveillance de l'environnement (Lése). Aujourd'hui encore, ce laboratoire relevant de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) est la structure de référence en matière de surveillance radiologique de la Polynésie française.

Le Service mixte de surveillance radiologique (SMSR) était chargé de la surveillance du milieu physique (air, eau, sol) en Polynésie française ainsi que du suivi dosimétrique de l'ensemble du personnel employé sur les sites du CEP (cf. Chapitre VI). De son côté, le Service mixte de contrôle biologique (SMCB), responsable de la surveillance biologique de l'ensemble de la Polynésie française, effectuait les prélèvements d'échantillons des produits entrant dans la ration alimentaire des populations vivant dans les différents archipels. Ces deux services disposaient de laboratoires de mesure adaptés à leur mission. Le SMSR et le SMCB ont fusionné en 1994, pour former le Service mixte de sécurité radiologique et biologique de l'Homme et de l'environnement (SMSRB).

Depuis la fermeture du CEP, en 1996, l'ensemble des échantillons prélevés sur les sites d'expérimentations lors des campagnes annuelles de surveillance est envoyé au Service de radio-analyse, chimie de l'environnement (SRCE) de la Direction des applications militaires du CEA, où ils font l'objet d'une préparation et d'un traitement chimique avant la mesure de tous les radionucléides d'origines naturelle et artificielle, émetteurs alpha, bêta et bêta-gamma.

Les différents laboratoires de mesure ont participé régulièrement aux intercomparaisons nationales et internationales qui ont permis de valider leurs résultats au cours du temps. Depuis 1996, toutes les analyses environnementales du SRCE sont couvertes par l'accréditation Cofrac (Comité français d'accréditation) et depuis 2004, ce service est agréé par la Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection (DGSNR) pour les analyses environnementales.

III.2 - CHOIX DES COMPOSANTES À SURVEILLER

La qualité et la cohérence d'une surveillance radiologique résident dans la rigueur des opérations de prélèvement, de préparation et de conditionnement des échantillons. Mais, avant tout prélèvement, il est nécessaire de procéder à une sélection des indicateurs environnementaux les plus judicieux en fonction de deux objectifs majeurs :

- connaître, à tout moment, les niveaux représentatifs de la radioactivité d'origine artificielle des différentes composantes de l'environnement ;
- estimer la composante dosimétrique associée aux niveaux d'activité des radionucléides d'origine artificielle mesurés. Depuis l'arrêt des essais atmosphériques, cette

composante est essentiellement associée à l'exposition interne, par ingestion d'aliments contenant des radionucléides issus des dépôts historiques.

Pour satisfaire ces objectifs, des échantillons représentatifs des différentes composantes physiques (biotope) et biologiques (biocénose) de l'environnement doivent être prélevés, en association avec ceux de la ration alimentaire de la population vivant en Polynésie.

La surveillance radiologique des biotopes concerne l'atmosphère, l'hydrosphère et la géosphère. L'atmosphère est caractérisée par des prélèvements d'aérosols et d'eau de pluie ; le domaine terrestre par des prélèvements d'échantillons de sols et d'eaux de source et de rivière ; le domaine marin par des échantillons d'eaux de mer, des lagons et de l'océan, de matières en suspension (MES) et de sédiments.

L'ensemble des espèces présentes dans les différentes biocénoses ne pouvant toutes être échantillonnées dans le cadre d'une surveillance radiologique, un choix doit être fait. Cette sélection des espèces, tant végétales qu'animales, nécessite une bonne connaissance de l'écologie des sites surveillés. Sur les atolls polynésiens, et en particulier ceux de Mururoa et de Fangataufa, les prélèvements d'indicateurs biologiques ont été réalisés dans le milieu terrestre (îlot ou *motu*) et dans le milieu marin (lagon et océan). Les indicateurs biologiques sélectionnés devaient répondre à un ou plusieurs des critères suivants :

- permanence et disponibilité en quantité suffisante de l'espèce, au cours du temps, dans une aire géographique donnée, associée à une facilité de récolte ;
- vitesse d'incorporation des radionucléides par l'espèce considérée, qui détermine la rapidité avec laquelle est obtenu l'équilibre entre l'activité des radionucléides dans l'espèce et l'activité de ces mêmes radionucléides dans le milieu ambiant. Lorsque cette vitesse est élevée, ces bioindicateurs dits sentinelles jouent le rôle de balises biologiques. Ils sont en permanence révélateurs de l'évolution spatio-temporelle des niveaux d'activité de l'eau et de l'atmosphère;
- aptitude de l'espèce, ou d'un organe de l'espèce, à concentrer un ou plusieurs radionucléides. Plus le facteur de concentration F_c sera élevé (cf. Chapitre II), plus il sera aisé de mettre en évidence les traces de radioactivité ajoutée dans l'environnement ;
- appartenance de l'espèce à la ration alimentaire des populations vivant en Polynésie.

Les modalités de la surveillance radiologique justifiées par les activités menées au CEP ont évolué au cours du temps, en fonction des conditions des essais. Deux périodes doivent être considérées.

La première de 1966 à 1974, est celle des essais atmosphériques. Deux types de contribution de radionucléides dans l'environnement peuvent alors être distingués, les apports correspondant aux essais sur barge et ceux liés aux essais sous ballon. Durant cette période, la préoccupation majeure sur les sites, était de garantir la sécurité des expérimentateurs qui circulaient sur le lagon, effectuaient des travaux sous-marins, utilisaient et consommaient l'eau en provenance des bouilleurs des bateaux présents dans le lagon. Concernant les populations polynésiennes, la préoccupation était de vérifier que l'exposition due aux retombées des essais restait bien inférieure aux limites annuelles définies dans la réglementation. Dans les deux cas, il s'agissait de poursuivre un objectif de radioprotection en vérifiant qu'il n'y avait pas d'accumulation des radionucléides au cours du temps au-delà des concentrations maximales admissibles.

La deuxième période, de 1975 à 1996, est celle des essais souterrains. Elle est caractérisée par des apports d'activité quasi inexistantes dans la biosphère et limités à l'environnement des lagons des atolls d'expérimentations. L'objectif principal de la surveillance radiologique, outre les aspects de radioprotection, était également de vérifier le bon confinement des radionucléides au sein du massif géologique. La radioactivité artificielle du lagon ayant décliné rapidement après l'arrêt des essais atmosphériques, il s'agissait de suivre l'évolution à la baisse de l'activité des radionucléides à l'état de traces. Les techniques de prélèvement et de mesure ont été adaptées à cet objectif. Un suivi radiologique de type environnemental à des niveaux d'activité très faibles a été mis en place afin de détecter un relâchement éventuel de radionucléides à partir des cavités souterraines.

III.3 – STRATÉGIE DE PRÉLÈVEMENT D'ÉCHANTILLONS

Le système de surveillance de l'environnement et des produits entrant dans la chaîne alimentaire conduisant à l'Homme peut être décrit comme un système à emboîtements à trois niveaux en partant du terme source : les sites d'expérimentations, le territoire polynésien au-delà de 12 milles nautiques des sites d'expérimentations et enfin de l'ensemble de l'hémisphère Sud. La stratégie de prélèvements a été adaptée pour tenir compte de l'évolution des procédures d'essai entre 1966 et 1996, puis de l'arrêt des essais jusqu'à nos jours.

III.3.1 - SITES D'EXPÉRIMENTATIONS

III.3.1.1 - REPÉRAGE GÉOGRAPHIQUE DES STATIONS DE SURVEILLANCE

Dès 1962, des missions hydrographiques ont dressé une carte précise des atolls. Sur la bande corallienne, les points précis ayant servi aux relevés topographiques, ont emprunté leurs noms à ceux de fleurs, oiseaux, prénoms féminins, ainsi qu'à des éléments de l'alphabet phonétique international. Ces noms ont ensuite servi à désigner les zones entourant ces points.

Pour les besoins des essais souterrains sous les lagons, un système complémentaire de repérage de la partie sous-marine a été défini sous la forme d'un quadrillage de mailles de 500 mètres par 500 mètres, dont la position est précisée par des noms d'animaux marins en abscisse et des chiffres en ordonnée (Fig. 47).

Dans certains cas, les appellations d'installations techniques caractéristiques ont été substituées au nom du lieu sur lequel elles étaient implantées. C'est le cas, à Mururoa, pour :

- le Poste de commande de tir (PCT), en zone Anémone ;
- les zones d'activités utilisées par les personnels militaires (zone Martine) et par les personnels civils (zone Anémone). Cette zone est le point kilométrique de départ (PK zéro) des bornes kilométriques de la route allant soit vers le nord (PK Nord) soit vers le sud de l'atoll (PK Sud). Ce repérage était utilisé plus particulièrement pour localiser les essais souterrains sous la couronne corallienne (par exemple PK 3 Nord, PK 6 Sud) ;
- les zones industrielles (zones Nicole et Odette) où se trouvaient la centrale électrique, la centrale d'ensilage du ciment, l'incinérateur et la centrale de concassage des agrégats coralliens ;
- la zone aéroportuaire où étaient mouillés ou embossés la plupart des bâtiments dont le *BSL Rance*, bâtiment de sécurité radiologique et médicale, le *BSL Garonne* et les bateaux bases avant l'installation à terre des personnels, en 1973.

L'ensemble de ces repères a été utilisé pour positionner les points zéro des essais, les zones faisant l'objet d'un suivi et les stations de surveillance de l'environnement.

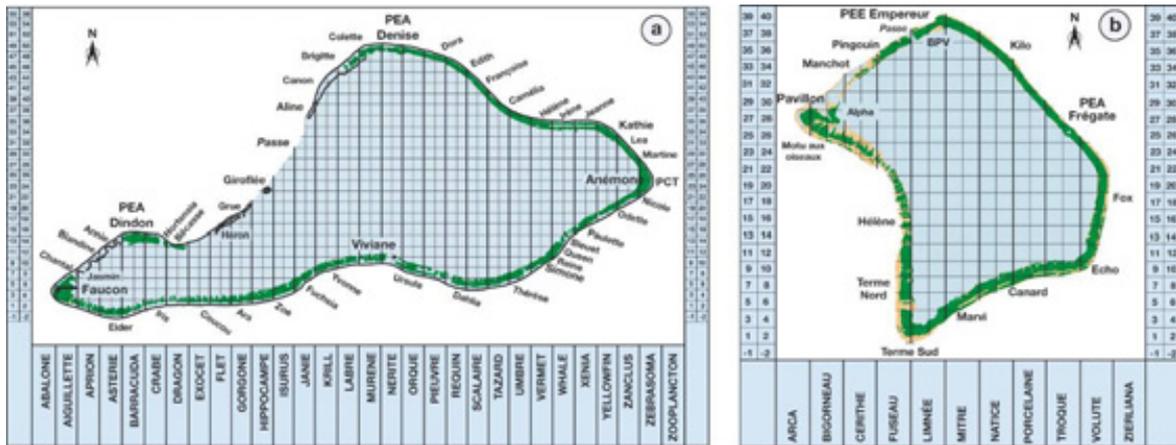


FIG. 47 - Repères géographiques utilisés lors des essais aériens et souterrains, et dans le cadre de la surveillance environnementale des sites de Mururoa (a) et Fangataufa (b).

III.3.1.2 – PROCÉDURES DE SURVEILLANCE

Durant la période des essais atmosphériques, les appareils de prélèvement d'aérosols, dont la finalité est de participer à la radioprotection du personnel, sont placés dans les zones où celui-ci était temporairement présent, dans les Postes de contrôle radiologique (PCR) terrestres ou embarqués sur les bateaux. Pendant l'essai, le personnel était évacué des sites d'expérimentations (cf. Annexe 4).

Dans les lagons, les niveaux d'activité volumiques atteints par les eaux contaminées par l'essai permettaient leur localisation géographique rapide. Ainsi, le jour de l'essai, et dans certains cas les jours suivants, une cartographie de la radioactivité du lagon était dressée à partir de mesures directes du débit de dose, au-dessus de la surface de l'eau, avec une chambre d'ionisation. Parallèlement, une première mission hélicoptérée, dite RAD 1, prélevait un échantillon d'eau de mer à l'aplomb du point zéro. La décroissance de cet échantillon était suivie par des mesures répétitives en laboratoire, identifiant la contribution des différents produits de fission et d'activation. Les jours suivants, des cartographies du lagon étaient réalisées à partir de missions de reconnaissance utilisant un détecteur d'iodure de sodium tracté au bout d'un câble. Lorsque l'activité était proche de la limite de détection de l'équipement, la cartographie était réalisée à partir d'échantillons prélevés dans les différents secteurs du lagon et mesurés en laboratoire. Ces cartes, qui étaient utilisées pour décider du retour du personnel sur site, sont présentées dans l'annexe 3 pour chaque essai.

Durant la période des essais souterrains, bien que les rejets attendus de radionucléides dans l'environnement devaient être très faibles, un dispositif permanent de surveillance de la radioactivité a été maintenu pour garantir la protection du personnel qui restait sur l'atoll (cf. Chapitre II). Les premières années, il était composé de :

- stations de télémesures transmettant le débit de dose et de stations de prélèvement d'aérosols atmosphériques (par pompage $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) en zones Denise et Martine-Anémone ;
- dosimètres photographiques et de dosimètres thermoluminescents mesurant la dose intégrée mensuelle. Ceux-ci étaient uniformément répartis sur l'ensemble des deux atolls.

Ce dispositif de surveillance a été complété par un Poste de contrôle biologique (PCB) implanté dans les zones d'activité de Mururoa.

En période opérationnelle, ce réseau était renforcé par la mise en place de dispositifs de recueil des retombées éventuelles et par une augmentation du nombre de stations de télémesures. Ainsi, le suivi radiologique spécifique de la partie terrestre de la zone proche du point zéro était assuré, au moment d'un essai, par la mise en place (Fig. 48) :

- d'un suivi par télémesures du débit de dose aux quatre points cardinaux de la zone d'essai, à proximité des cabines d'enregistrement et du réseau de prélèvement des gaz, quand il était mis en œuvre, soit une dizaine de détecteurs ;
- d'appareils de prélèvements d'aérosols atmosphériques, sur filtre fixe ;
- d'appareils de mesure en continu de la radioactivité atmosphérique ;
- de nombreux dosimètres photographiques et thermoluminescents ;
- de bacs et coupelles pour évaluer les éventuels dépôts au sol ;
- d'un «dispositif polytubes» de prélèvement d'échantillons de l'eau libre des puits pour le contrôle de la radioactivité en laboratoire.

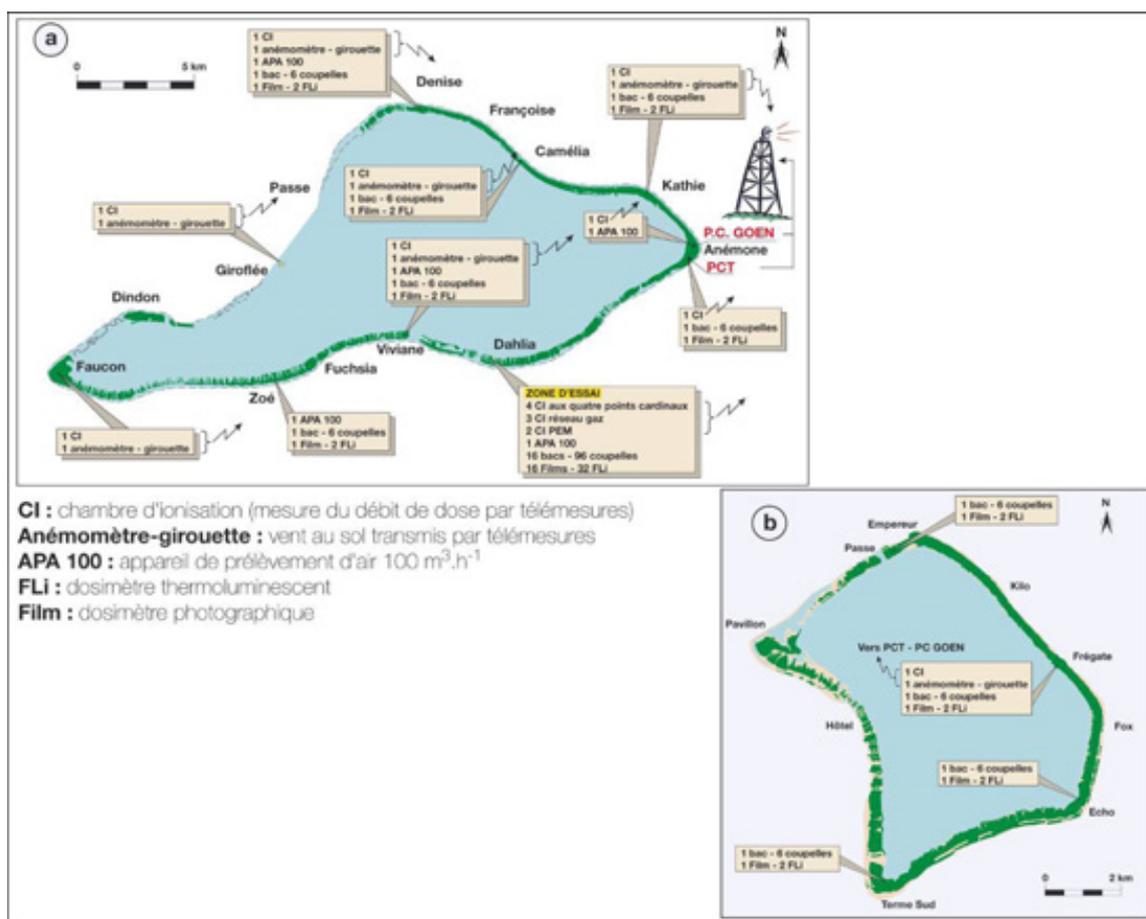


FIG. 48. – À titre d'exemple, présentation de l'ensemble du dispositif de surveillance mis en place sur les sites de Mururoa (a) et de Fangataufa (b) lors de l'essai souterrain Polyphème réalisé le 27 février 1978.

Lors des essais souterrains sous le lagon, le dispositif de surveillance était basé sur la mesure de la radioactivité près du point zéro et sur celle du débit de dose sur la barge d'enregistrement mesures (BEM) où étaient mis en place :

- des systèmes de télémesures assurant la surveillance en continu du débit de dose au niveau de la plaque de raccordement des câbles et des cabines d'enregistrement des paramètres de l'essai ;
- des dosimètres thermoluminescents positionnés au niveau de chaque capteur radiologique et sur les portes des cabines, permettant d'évaluer l'exposition des personnels chargés de récupérer les enregistrements.

De même, lors des opérations de post-forage réalisées après chaque essai pour recueillir des échantillons dans la cavité-cheminée, la surveillance spécifique du point zéro sur la couronne était assurée par des chambres d'ionisation positionnées au point de forage, sur la zone de rejet des boues de forage. Un *shelter*, situé à proximité du chantier de forage, abritait les équipements centralisant les informations radiologiques et celles concernant la toxicité et l'explosibilité des gaz. Une cabine vestiaires-douches était implantée à l'entrée de la zone contrôlée du chantier de forage.

En *off shore*, la barge de forage et de manutention (BFM) et la plate-forme de forages pour tir sous lagon (Tila) disposaient d'un équipement équivalent pour suivre les niveaux de radioactivité et détecter la présence de gaz explosifs. Les signaux des différents capteurs étaient regroupés dans une Cabine de mesures radiologiques (CMR) équipée d'un tableau de contrôle des radiations (TCR). Toutes les informations des capteurs radiologiques et des détecteurs de toxicité chimique des gaz et de leur explosibilité, qui étaient implantés sur la barge de forage, aboutissaient au TCR. Les informations des deux capteurs fixés sur la tulipe de la tête de puits du Forage grand diamètre (FGD) et sur le toit de la CMR, étaient retransmises au TCR et au Poste de commande de tir (PCT). En cas de fuite de gaz au niveau du puits de l'essai, celui-ci pouvait être coiffé d'une cloche, rigide ou souple, qui permettait de confiner temporairement les gaz, d'en quantifier les volumes et la radioactivité.

Au niveau de la plate-forme de forage, comme pour le dispositif terrestre, les capteurs radiologiques et ceux des gaz explosifs ou toxiques (H₂, CO, CO₂, CH₄) étaient implantés sur le plancher de forage, sur le dispositif de retour des boues du forage, sur la tête du puits du post-forage, sur l'aire de dépôtage, etc. Un circuit de prélèvements atmosphériques permettait de surveiller l'ensemble des installations de la barge de forage.

En dehors du réseau installé lors de la réalisation d'un essai, les modalités de fonctionnement du réseau permanent de suivi de l'environnement, en particulier pour la surveillance des eaux marines, ont évolué au cours du temps, tout en restant très proches de celles définies en 1985, à savoir :

- des prélèvements annuels à l'intérieur des lagons de Mururoa et de Fangataufa. La fréquence, la localisation et la profondeur des prélèvements ont évolué au cours du temps, vers une optimisation du dispositif de surveillance ;
- des prélèvements réalisés aux abords immédiats des atolls de Mururoa (8 stations) et de Fangataufa (6 stations). Selon les emplacements, les prélèvements sont effectués, le plus près possible du récif, en surface, à 200, 400 et 600 mètres (surface, 150 et 300 mètres pour les passes) ;

- des prélèvements en milieu océanique, effectués en 7 emplacements situés à 12 milles nautiques des deux sites d'expérimentations. Ils sont principalement réalisés en surface, mais également en profondeur (300, 600 et 900 mètres), à partir de 1994.

De plus, deux profils océaniques du tritium (eau tritiée, HTO), en fonction de la profondeur, ont été réalisés, en 1988, à l'est et à l'ouest de Mururoa ; ainsi qu'un profil vertical océanique, en 1993, analogue à celui effectué au large de Tahiti.

Pour les sols, un bilan de la radioactivité résiduelle a été réalisé à Mururoa, en 1992, à partir de prélèvements de surface sur les deux premiers centimètres du sol, effectués selon un maillage de 100 m de côtés, les carottages allant jusqu'à 42 cm de profondeur (Fig. 49).

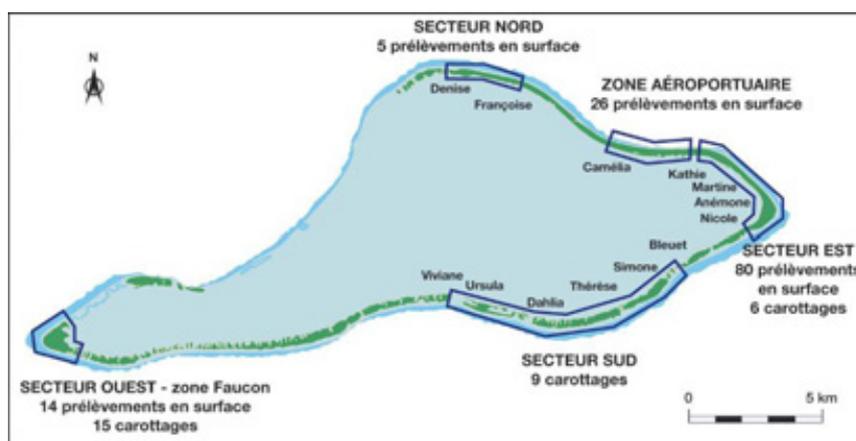


FIG. 49. - Localisation des zones de prélèvement et du nombre d'échantillons de sol prélevés par secteur, en 1992, sur l'atoll de Mururoa.

III.3.2 - POLYNÉSIE FRANÇAISE

La surveillance de la radioactivité du territoire polynésien au-delà de la limite des eaux territoriales des sites d'expérimentations est effective depuis le début des années 1960. À l'origine, cette surveillance s'inscrivait dans le cadre plus large du Réseau mondial français de surveillance radiologique (RMFSR) décrit dans le paragraphe suivant. Depuis 1966, et encore aujourd'hui, un rapport annuel regroupant les résultats obtenus dans le cadre de cette surveillance, hors Mururoa et Fangataufa, est transmis à l'*Unsear*, via le ministère des Affaires Étrangères.

Compte tenu de l'importance de la superficie des territoires concernés, de la faible densité des populations susceptibles d'être exposées aux retombées des essais atmosphériques et de la diversité de leurs modes de vie, différentes îles ont été retenues pour la surveillance radiologique, en fonction de quatre critères :

- couvrir géographiquement l'ensemble du territoire de la Polynésie française, presque 2 000 km d'est en ouest et du nord au sud, soit près de 4 000 000 de km² ;
- tenir compte de la typologie des deux catégories d'îles ; îles hautes et atolls, et ceci avec le souci de respecter les diversités environnementales et écologiques ;

- respecter la démographie, très hétérogène, de la Polynésie française ;
- tenir compte de la position des deux atolls de Mururoa et Fangataufa et des vents dominants, facteur important quant aux trajets potentiels des retombées des essais.

Ces critères ont conduit à sélectionner différentes îles représentatives des 5 archipels et à les intégrer au réseau de surveillance radiologique du territoire polynésien. Ainsi, pendant toute la période des essais atmosphériques, des mesures étaient réalisées en continu par différents dispositifs complétés par des mesures en laboratoire d'échantillons environnementaux et de la chaîne alimentaire.

Le réseau de surveillance comprenait :

- les Postes de contrôle radiologique (PCR) ;
- les Postes de surveillance radiologique (PSR) ;
- les Télémessures sites et atolls (TLM) ;
- le réseau des bouées Antoinette ;
- les moyens de détection des navires et aéronefs ;
- les Postes de contrôle biologique (PCB) ou Postes de prélèvements biologiques (PPB).

Ce réseau couvrait l'ensemble du territoire de la Polynésie française avec des PCR, à terre ou embarqués à bord des navires. Les moyens de contrôle les plus complets (PCR et PCB) étaient implantés dans les îles ou atolls habités les plus proches des sites d'expérimentations (Tureia, Reao, Gambier) et ceux plus éloignés comme Tahiti (Société) en raison de l'importance de sa population ainsi que ceux des Marquises et des Australes, comme références (Fig. 50).

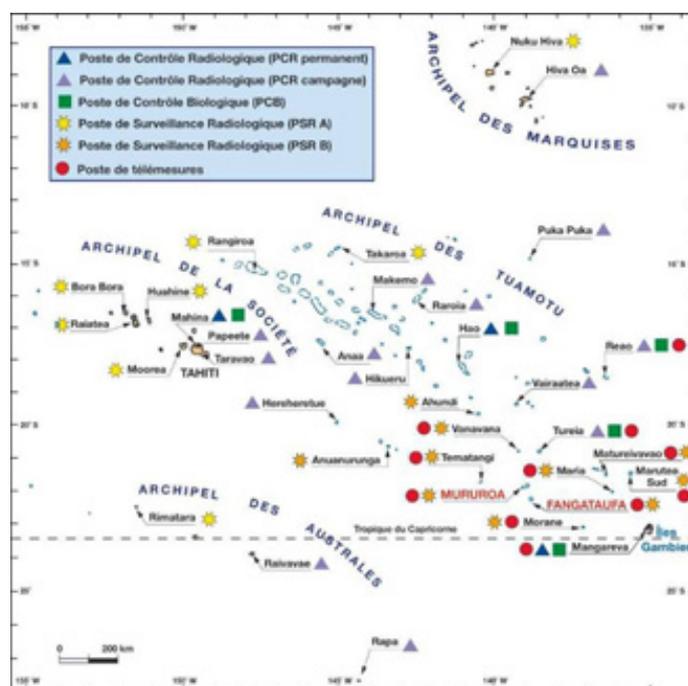


FIG. 50. – Localisation des postes de contrôle et de surveillance radiologique et biologique, en Polynésie française, lors de la période des essais atmosphériques.

Lors des premières années des essais atmosphériques, dans les lieux inhabités et sur mer, des télémessures (réseau TLM et des lignes de bouées de type Antoinette) rendaient compte du passage éventuel du nuage radioactif et du niveau de l'activité déposée à la surface du sol ou des eaux. Le réseau complet de bouées était constitué de 5 lignes :

- la ligne Zoulou était larguée sur un arc de cercle, à 70 nautiques du point zéro,
- les lignes Yankee (au nord) et X-ray (au sud) étaient positionnées sur un arc de cercle, à 120 nautiques,
- les lignes Whisky (au nord) et Victor (au sud) étaient positionnées sur un arc de cercle, à 190 nautiques.

En fonction des caractéristiques de l'essai, certaines lignes de bouées pouvaient être supprimées. À titre d'exemple, pour l'essai mégatonnique Canopus du 24 août 1968, la ligne la plus proche du point zéro, Zoulou, avait été mise en place avant l'essai et les autres après l'essai, en tenant compte des caractéristiques du nuage et des dernières observations météorologiques (Fig. 51).

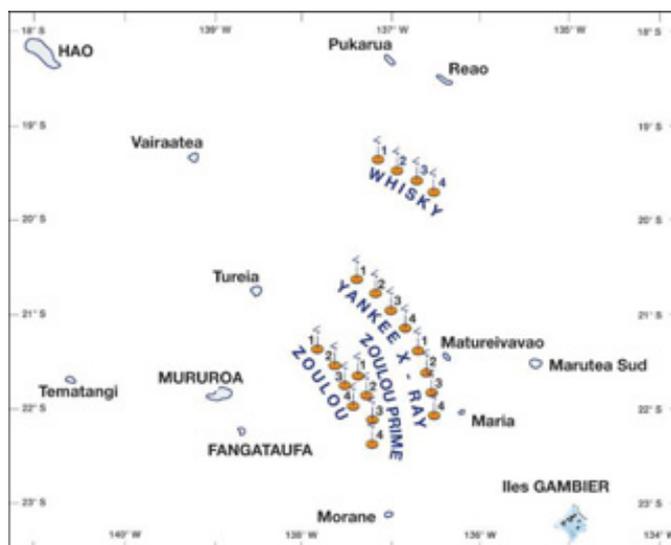


FIG. 51. - Position des différentes lignes de bouées mises en place lors de l'essai mégatonnique Canopus du 24 août 1968

Dans le cas de situations météorologiques complexes, des lignes de bouées complémentaires (appelés Juliette, Kilo, Lima etc.) pouvaient éventuellement être mises en place en fonction de l'évolution des conditions météorologiques après l'essai, au vent d'atolls habités, dans un objectif d'alerte. Les installations de ce dispositif fournissaient un ensemble très complet de mesures, réalisées avec des matériels spécialement conçus pour résister aux conditions tropicales. Des équipements «tropicalisés», dérivés de cette génération de matériels, sont encore utilisés pour réaliser des mesures dans des environnements agressifs.

Pendant la période des essais souterrains, le dispositif de surveillance des niveaux de la radioactivité atmosphérique a été allégé au cours du temps, puisque le risque d'une contamination de l'atmosphère était inexistant, en dehors de la zone du lagon où était effectué l'essai.

Cependant, à titre de précaution, le dispositif en place lors de la période des essais atmosphériques a été pour l'essentiel reconduit lors des premiers essais souterrains, en 1975 (Fig. 52).

Il reposait alors sur les moyens de mesure et d'intervention suivants :

- des PCR à terre à Tureia, Reao, Totegegie (îles Gambier), Hao et Tahiti (station permanente de Mahina) ;
- des PCR embarqués sur les navires *E.V. Henry*, *Rivière*, *Protet*, *Paimpolaise*, *Lorientaise* et *BCB Marara* ;
- des PSR à Taravao (Tahiti), Bora Bora, Rangiroa, Makemo, Hiva Oa, Hereheretue, Raivavae, Tubuai ;
- un réseau de balises de télémesures implantées sur les atolls de Tematangi, Matureivavao, Morane, Pukarua, Vahitahi, Vairaatea, piloté par la station centrale de Tureia ;
- un PCB à Tahiti (station permanente de Mahina), Hao, Reao, Tureia et Mangareva (îles Gambier) ;
- un aéronef équipé de moyens de détection de la radioactivité d'un nuage issu d'une éventuelle fuite, pouvant réaliser un largage de bouées radiologiques ;
- le *BCB Marara* pour la détection d'une éventuelle émission sous-marine au moment de l'essai et pour le suivi de routine du milieu correspondant à la zone océanique des 200 milles nautiques prévue par les conventions internationales ;
- le *BDC Trieux* était en alerte pour une éventuelle intervention sur un atoll habité.

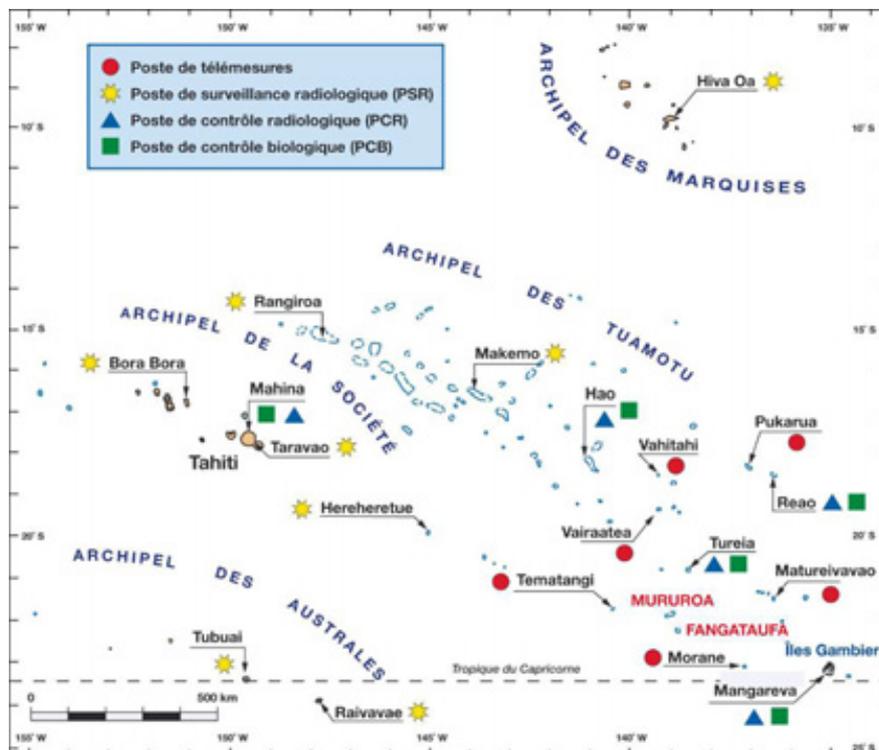


FIG. 52. – Localisation des postes de contrôle et de surveillance radiologique et biologique en Polynésie française lors des essais souterrains effectués en 1975.

Après l'obtention des garanties scientifiques d'une absence totale de risque radiologique pour les atolls les plus proches des sites d'expérimentations lors des essais souterrains, le réseau de surveillance a été remanié. De 1976 à 1978, les PCR et PCB ont progressivement été remplacés par des dispositifs de mesure allégés. Le PCB et le PCR de Tahiti, positionnés à Mahina, ont toutefois été maintenus, à titre de référence pour la mesure de la radioactivité de l'hémisphère Sud.

Le réseau de télémesures, qui fournissait des valeurs du débit de dose en temps réel, ne se justifiait plus dans le contexte des essais souterrains. Il a donc été supprimé en 1983, pour être remplacé par une surveillance de la dose intégrée au cours du temps à l'aide de dosimètres passifs (films et dosimètres CaSO_4 de grande sensibilité) sur les îles habitées proches des sites d'expérimentations : Tematangi, Tureia, Marutea Sud, Nukutavake, Reao, Taku (îles Gambier) et Pukarua.

Pendant toute la durée des essais souterrains, ces dosimètres ont donné des résultats correspondant à des niveaux d'exposition dus au rayonnement cosmique naturel, confirmant l'absence d'exposition d'origine artificielle. Les collecteurs de retombées des aérosols et des pluies du réseau de PSR ont été maintenus pendant quelques années à Tahiti (Arue), Hiva Oa, Tubuai, Hao et Mururoa et intégrés à la surveillance des retombées de la radioactivité atmosphérique résiduelle de l'hémisphère Sud, en complément des appareils de prélèvement d'aérosols en place à Mururoa.

Les équipes scientifiques du *BCB Marara* ont poursuivi les prélèvements d'échantillons dans toutes les zones maritimes et terrestres de la Polynésie française. Il faut noter que des prélèvements d'eaux de mer de surface ont régulièrement été effectués dans le domaine océanique au voisinage des 4 îles polynésiennes, Tahiti, Hiva Oa, Tubuai et Mangareva (Gambier), pour servir de référence de la radioactivité des eaux du Pacifique Sud. En complément, deux profils verticaux océaniques ont été réalisés, en 1988 et 1993, au large de Tahiti. Le premier était destiné à la mesure du tritium (forme HTO), de la surface à 1 200 mètres de profondeur. Le second a permis de déterminer la répartition verticale des concentrations en ^{90}Sr , ^{137}Cs et $^{239+240}\text{Pu}$, jusqu'à 2 300 mètres de profondeur.

À l'heure actuelle, le réseau de surveillance radiologique du territoire polynésien est maintenu sur 7 îles représentatives des 5 archipels :

- Archipel de la Société. Deux îles ont été sélectionnées : Tahiti et Maupiti. Tahiti, d'une surface émergée de 1 042 km² est la plus grande île de l'archipel. Elle accueille 70 % de la population du Territoire avec 170 000 habitants en 2002. Maupiti a une superficie de 12 km² sur lesquelles vivent environ 1 000 habitants. Elle se situe à l'extrême ouest de l'archipel de la Société.
- Archipel des Tuamotu. Deux îles ont été retenues : Rangiroa et Hao. Rangiroa se trouve à l'extrême nord-ouest de l'archipel. C'est le plus grand et le plus peuplé des atolls des Tuamotu, avec 79 km² de terres émergées et environ 2 350 habitants. Au sud-est de l'archipel, il est situé à 450 km, au nord-ouest de Mururoa. Hao est un atoll d'une superficie totale de 720 km², dont 30 km² de terres émergées. Avec 1 300 habitants, Hao est, après Rangiroa, l'atoll le plus peuplé de l'archipel des Tuamotu.
- Archipel des Gambier. Mangareva qui a été retenue pour la surveillance est la plus grande île de l'archipel. C'est une île haute de 15 km², comptant un peu plus d'un millier d'habitants. Il s'agit de la seule île retenue pour la surveillance radiologique qui soit située à l'est des atolls de Mururoa et Fangataufa, dont elle est distante de 450 km.

- Archipel des Marquises. Hiva Oa fait partie du groupe sud des îles de cet archipel. C'est une île haute de 315 km², habitée par environ 2 000 personnes en 2002. Elle est considérée comme la plus fertile. Hiva Oa présente la particularité de se situer au nord du territoire polynésien, à 1 800 km des atolls de Mururoa et Fangataufa. C'est l'île la plus éloignée des atolls d'expérimentations à faire l'objet d'une surveillance radiologique.
- Archipel des Australes. L'île retenue est Tubuai. Avec 45 km², c'est la plus grande des cinq îles habitées. 2 200 habitants y ont été recensés en 2002. Elle est localisée à environ 1 100 km des atolls de Mururoa et Fangataufa.

Ce sont les résultats de la surveillance radiologique, essentiellement des produits alimentaires, de ces 7 îles et atolls qui sont aujourd'hui transmis à l'*Unsear*.

III.3.3 - RÉSEAU MONDIAL FRANÇAIS DE SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE

En 1960, la surveillance radiologique des atolls polynésiens s'inscrivait dans le cadre du Réseau mondial français de surveillance radiologique (RMFSR). Le SMSR était également chargé de recueillir les informations issues d'un réseau mondial de postes de contrôle de la radioactivité pour suivre les retombées radioactives troposphériques et stratosphériques des essais français, mais aussi de la radioactivité résiduelle provenant des campagnes d'essais, importantes de par leur nombre et la puissance des explosions, menées par les États-Unis, l'URSS et le Royaume-Uni durant la décennie précédente. Les stations de prélèvements d'aérosols atmosphériques et de produits alimentaires, étaient réparties sur l'ensemble de la planète au niveau des territoires français : métropole et territoires d'outre-mer, de pays étrangers où la France disposait d'une implantation (bases militaires) et plus particulièrement des pays d'Amérique du Sud avec lesquels une coopération bilatérale avait été établie : Chili, Colombie, Équateur et Pérou (Fig. 53).

À l'arrêt des essais atmosphériques, en 1975, le réseau s'est allégé des stations situées en dehors du territoire polynésien, en particulier celles situées en Amérique du Sud.



FIG. 53. - Localisation des stations de prélèvement d'échantillons d'aérosols atmosphériques et de produits alimentaires appartenant au réseau mondial français de surveillance radiologique.

III.4 - PRÉLÈVEMENTS D'ÉCHANTILLONS ENVIRONNEMENTAUX

Les équipements de prélèvement et les protocoles de mesure ont évolué au cours du temps afin de pouvoir quantifier la baisse des niveaux d'activité de l'environnement lors du passage des essais atmosphériques aux essais souterrains, en tenant compte des progrès technologiques.

III.4.1 - PRÉLÈVEMENTS ATMOSPHERIQUES

Deux types d'échantillons, les aérosols et les eaux de pluies, sont prélevés pour caractériser les niveaux d'activité de l'atmosphère des sites.

III.4.1.1 - AÉROSOLS

Les aérosols et poussières atmosphériques sont collectés en continu sur des filtres au moyen de pompes à grand débit. Les filtres sont mesurés ultérieurement en laboratoire.

Pendant la période des essais atmosphériques, les appareils de prélèvements d'air étaient multiples. Ils couvraient les gammes 1, 10, 100 et exceptionnellement 1 000 m³.h⁻¹, l'appareil le plus utilisé à l'extérieur était l'APA 100, Appareil de Prélèvement Atmosphérique d'un débit de 100 m³.h⁻¹. Le spectre granulométrique des retombées proches étant constitué d'une fraction importante de particules lourdes, ces appareils étaient dotés d'une tête de prélèvement omnidirectionnelle permettant d'améliorer la collecte de cette fraction. Les résultats fournis par ces appareils, complétés par ceux des études granulométriques mettant en œuvre des impacteurs, des bacs collecteurs de retombées et des autoradiographies, permirent d'affiner la connaissance des spectres granulométriques des retombées afin d'améliorer les modèles de prévision de l'impact radiologique des essais atmosphériques.

Les modifications de l'APA 100 dans les années 1980 conduisirent à la qualification du CASA 110, Collecteur d'Aérosols de Surveillance Atmosphérique d'un débit de 110 m³.h⁻¹. La tête d'aspiration, placée à 1,20 mètre du sol, est protégée des intempéries par un chapeau conique. Le média filtrant utilisé est caractérisé par un rendement de piégeage de 99 % pour les particules inhalables. En revanche, les protocoles de prélèvement ont peu évolué au cours du temps : le prélèvement est d'environ 2 000 m³ filtrés sur 24 heures.

Dans le cadre de la surveillance de l'atmosphère réalisée à Papeete à Tahiti par le Lése (IRSN), les aérosols sont prélevés à l'aide d'un appareil à haut débit de 400 m³.h⁻¹. Le média filtrant est en polypropylène, de 27 par 48 cm de côté, ayant une capacité de rétention proche de 100% pour les particules de 1 à 10 µm. Le prélèvement est effectué en continu, les filtres étaient changés tous les cinq jours et groupés par deux pour la mesure de l'indice bêta global, du ⁹⁰Sr et des radionucléides émetteurs gamma.

Dans tous les cas, les équipements sont utilisés dans un environnement très contraignant (atmosphère tropicale avec une humidité relative pouvant atteindre 100 % en présence d'embruns salés, etc.). Un caisson d'isolation sonore mis en place dans les années 1980 permet leur utilisation en continu à proximité des habitations.



Changement du filtre sur un Casa.



Pluviomètres à Mururoa.

III.4.1.2 - EAUX DE PLUIE

La collecte des eaux de pluie est réalisée à l'aide d'un pluviomètre en inox, de forme conique et de 1 m² de surface de section efficace. Le prélèvement est généralement mensuel. Cependant, durant la période des essais atmosphériques, dans le cas de retombées significatives, la fréquence de prélèvement a été adaptée pour permettre de quantifier l'évolution de l'activité des dépôts humides au cours du temps. Les volumes d'eau de pluie collectés mensuellement sont variables puisqu'ils dépendent de l'intensité des pluies suivant les saisons.

III.4.2 – PRÉLÈVEMENTS EN DOMAINE TERRESTRE

Le suivi radiologique des composantes physiques du domaine terrestre est réalisé à l'aide d'échantillons d'eau de source et de boisson ainsi que d'échantillons de sol. La composante biologique est suivie à l'aide d'échantillons de végétaux, ou de produits agricoles, entrant dans la ration alimentaire polynésienne.

III.4.2.1 – EAU DE SOURCE/RUISSEAU

Les volumes d'eau prélevés directement dans le milieu atteignent aujourd'hui 400 litres par échantillon. À l'heure actuelle, en Polynésie, les prélèvements sont limités au site de Papenoo, à Tahiti avec une périodicité annuelle.

III.4.2.2 - EAU DE BOISSON

L'eau potable distribuée sur les bateaux bases stationnés dans le lagon des atolls d'expérimentations faisait l'objet d'un contrôle radiologique afin de garantir un niveau respectant la concentration maximale admissible dans les eaux de boisson. À bord de certains bateaux base, l'eau potable était obtenue par désalinisation de l'eau de mer à l'aide de bouilleurs. Le facteur de désalinisation, donc de l'activité, était de l'ordre d'un facteur 1 000. L'eau en sortie

des bouilleurs était stockée dans une cuve tampon isolée du circuit de distribution des bateaux. Elle faisait l'objet de prélèvements d'échantillons qui étaient mesurés par le laboratoire SMSR du BSL Rance. Après avoir vérifié que l'activité volumique était inférieure à la concentration maximale admissible pour l'eau de boisson, la cuve était connectée au circuit de distribution. L'approvisionnement en eau potable était également assuré par les ravitailleurs d'eau douce, Hanap et Giboulée, venant de Hao.

Sur les îles, les échantillons d'eau de boisson sont prélevés directement au robinet ou, dans le passé, étaient échantillonnés dans les réservoirs d'eau de pluie. Leur volume est de l'ordre de 40 litres. Afin d'atteindre des limites de détection plus basses par concentration des radionucléides, le Lése réalise aujourd'hui la collecte d'échantillons de 700 litres à Tahiti.

III.4.2.3 - SOLS

Les sols des atolls polynésiens, et en particulier ceux des deux atolls d'expérimentations, sont très pauvres en humus. Les débris de végétaux terrestres qui formeront, après décomposition et remaniement par la faune terrestre, le sol proprement dit, s'accumulent sur le substrat de base, constitué de sable ou de blocs de carbonate de calcium (calcite ou aragonite). Ce sol se présentera donc, soit sous forme d'éléments organiques en surface, soit sous forme de particules organiques associées à des quantités variables de sable de carbonate de calcium. Par endroit, la couche meuble est totalement inexistante, laissant apparaître la roche calcaire de base (dalle corallienne).

Pour les îles hautes, comme Tahiti, des cartographies complètes des sols ont été réalisées sur des radiales partant de la route littorale et remontant jusqu'au plateau. Sur chacune d'elles, des échantillons ont été systématiquement prélevés, sur le plateau, à mi-pente, dans la vallée et à proximité de la route littorale. Ces sols affichaient des caractéristiques différentes, pouvant influencer l'évolution au cours du temps des activités massiques des radionucléides d'origine artificielle susceptibles d'être présents dans les dépôts suite aux retombées radioactives.

Différents types de sols ont été identifiés :

- les sols de plateau sont des sols ferralitiques désaturés. Ils s'avèrent désilicifiés sur une profondeur pouvant dépasser le mètre, avec un taux de matière organique d'environ 10 % en surface, qui chute à quelques pour cent, à une vingtaine de centimètres de profondeur ;
- les sols de la zone intermédiaire, entre le plateau et la plaine côtière, sont de trois types : peu évolués d'apport colluvial, bruns eutrophes tropicaux humifères et ferralitiques moyennement ou faiblement désaturés. Leur désilicification est plus faible que les sols de plateau et leur taux de matière organique présente une grande variabilité, entre 5 et 20 % ;
- les sols de fond de vallée proviennent de la dégradation des apports colluviaux des flancs de la vallée et des alluvions déposées lors des fortes crues. Ils sont hétérogènes et moyennement riches en matières organiques, de l'ordre de 5 % ;
- les sols de bord de route sont d'apport colluvio-alluvial, à caractères vertiques fréquents. Leur teneur en matière organique est variable, de 4 à 14 %.

Les prélèvements de sols de surface sont exécutés, soit par raclage de la couche superficielle sur 1 cm d'épaisseur d'une surface de 100 cm² (cas de Fangataufa), soit à l'aide d'un gabarit de 20 cm sur 25 cm, permettant le recueil des deux premiers centimètres de sol.

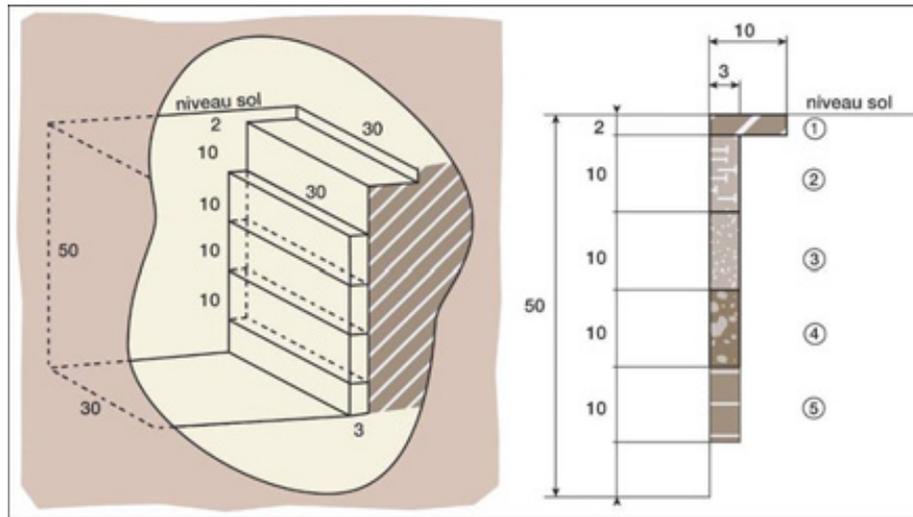


FIG. 54. – Schéma de principe des prélèvements d'échantillons de sol en fonction de la profondeur (les cotes sont données en cm).

Les prélèvements de sols en profondeur sont réalisés jusqu'à 42 cm, au moyen d'un carottier permettant l'échantillonnage de cinq tranches superposées de sol, d'une masse approximative d'un kilogramme (Fig. 54).

À partir des activités massiques de chaque radionucléide mesuré dans les différentes couches du sol, l'activité surfacique peut être calculée selon la formule suivante :

$$A_s = A_d \cdot h \cdot \rho$$

avec :

A_s = activité surfacique, en $Bq.m^{-2}$;

A_d = activité moyenne pondérée en profondeur, en $Bq.kg^{-1}$;

h = épaisseur de l'ensemble des prélèvements prise en compte, en m ;

ρ = masse volumique du sol prélevé ($1\ 600\ kg.m^{-3}$).

Dans le cas où l'activité massique des couches les plus profondes est inférieure à la limite de détection, l'activité surfacique est calculée par défaut et par excès, et l'activité surfacique retenue est la moyenne des résultats obtenus.

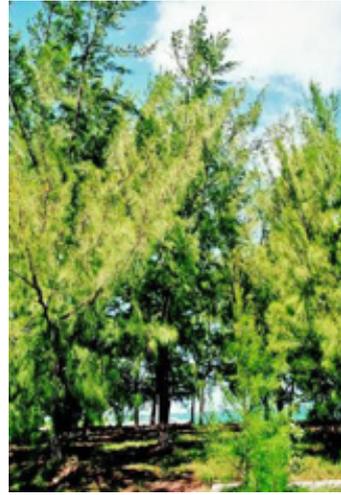
III.4.2.4 - VÉGÉTAUX

Sur les atolls d'expérimentations, quatre espèces de végétaux ont fait l'objet d'une surveillance radiologique particulière.

- Le *Scaevola sericea*, est une plante au port arbustif prostré, très largement répandue sur les atolls. Elle forme des fourrés denses sur les sables littoraux, dépassant rarement un mètre de hauteur.
- L'arbre de fer (*Casuarina equisetifolia*), appelé *aito* en polynésien et *filao* dans l'Océan Indien, est un arbre rameux, ressemblant à un conifère. Les feuilles, à forme d'aiguilles, piègent efficacement les particules atmosphériques. Cet arbre, importé de Tahiti pour servir de plante ornementale et de coupe-vent, a proliféré sur les atolls, pour devenir très abondant à Mururoa et Fangataufa. Des échantillons d'aiguilles font l'objet de mesures systématiques depuis 1982.



Massif de Scaevola sericea.



Aito (Casuarina equisetifolia).

- Le **cocotier** (*Cocos nucifera*) est un arbre de grande taille appartenant à la famille des palmiers. Il est très répandu dans les îles de Polynésie. À Mururoa, le cocotier a été introduit il y a plus de cent ans. La cocoteraie y est bien développée sur les plus grands îlots de la couronne récifale de l'atoll. Il était totalement absent à Fangataufa en 1966. En 1980, quelques dizaines d'arbres ont été plantés dans la zone Kilo. Compte tenu du temps nécessaire pour qu'un jeune plant donne des fruits en quantité suffisante, de 6 à 7 ans, les prélèvements de noix de coco, limités en nombre, n'ont débuté qu'en 1988.
- Le **papayer** (*Carica papaya*) a été introduit tardivement dans le secteur Est de l'atoll de Mururoa, lors de l'installation de la zone d'habitation. Ses fruits ont donc fait l'objet d'une surveillance régulière, de 1979 à 1995.

Les échantillons de feuilles de *Scaevola* et du *Casuarina* étaient prélevés à la main, puis mesurés sans être lavés. Des échantillons complémentaires de bois, écorce, tige, etc. de ces végétaux ont également été prélevés pour des études particulières.



Cocotier (Cocos nucifera).



Papayer (Carica papaya).

III.4.2.5 - PRODUCTIONS AGRICOLES POLYNÉSIENNES

Sur les atolls d'expérimentations, il n'y avait aucune production agricole et une interdiction, toujours en vigueur, de consommer les fruits des arbres poussant sur place.

L'ensemble des archipels a fait l'objet d'un suivi radiologique des productions agricoles locales tant végétales qu'animales.

Échantillons de la ration alimentaire

Depuis 1966, divers échantillons de végétaux issus de la production agricole et entrant dans le régime alimentaire des Polynésiens sont régulièrement prélevés sur différentes îles des cinq archipels, dans le cadre de la surveillance radiologique.

Ils appartiennent à 5 grandes catégories :

- les légumes - feuilles : chou, *fafa* (sorte d'épinard), poireau et salades diverses ;
- les légumes - fruits: aubergine, avocat, concombre, haricot vert, potiron, tomate et *uru* ou fruit de l'arbre à pain ;
- les légumes - racines : carotte, manioc, gingembre, navet, patate douce, pomme de terre, *tarua* et *taro*;
- les fruits : ananas, banane, citron, coco coprah, melon, pamplemousse, papaye, mangue et pastèque ;
- les viandes : bœuf local, chèvre, oeuf, porc et poulet.



Échantillons divers d'origine terrestre sur le marché de Papeete.

Des produits alimentaires importés, de France, d'Australie, de Nouvelle-Zélande et des États-Unis, sont également achetés dans les magasins de Papeete (Tahiti). Les résultats de mesure obtenus sur les produits importés achetés à Tahiti étant considérés comme représentatifs de ceux des cinq archipels, ils ne sont pas prélevés dans les autres îles. Ces échantillons concernent la viande d'agneau, de bœuf et de poulet, le pain, les pâtes alimentaires, les pommes de terre, le riz, les yaourts et la bière.

La bière, le jus d'ananas local, le Coca-Cola et d'autres boissons sucrées, importées, sont analysés aujourd'hui, à raison de 10 litres une fois dans l'année.

Les données étant nombreuses, seuls les résultats des noix de coco (eau et coprah) pour les végétaux et du lait de vache pour les productions animales seront détaillés dans le chapitre V.

Noix de coco

L'eau de coco est largement consommée dans l'ensemble de la Polynésie. La ration journalière des populations vivant sur les atolls est estimée à un litre par personne. Elle renferme des sucres et des sels minéraux, notamment du potassium, en proportions variables suivant la maturité de la noix (20 g d'extrait sec par litre pour les noix mûres). Le coprah entre pour une moindre part dans l'alimentation humaine. Cependant, il participe largement à l'alimentation du bétail de certains atolls sous la forme de tourteaux, obtenus après extraction de l'huile. Depuis 1962, la noix de coco fait l'objet d'une surveillance radiologique, tant pour son eau que pour son coprah (albumen).

Pour l'analyse de l'eau de coco, les noix sont collectées jeunes, avec l'écorce encore verte (*Via-Via* en polynésien). La mesure est réalisée sur 50 g de cendres. Le taux de cendres de l'eau de coco étant de l'ordre de 0,5%, il faut traiter 10 litres d'eau, ce qui correspond au contenu de 30 à 40 noix.

Pour l'analyse du coprah, les noix sont prélevées à maturité (*opaa* en polynésien). Le taux de cendres du coprah étant de l'ordre de 1%, il faut traiter au moins 4 kg de coprah pour constituer un échantillon de 50 g, ce qui correspond à environ 20 noix.



Prélèvement d'eau de coco d'une noix jeune.



Prélèvement de coprah d'une noix de coco arrivée à maturité.

Lait de vache

Le lait, consommé sous des formes très diverses, est un élément essentiel de l'alimentation humaine. Cet aliment est un constituant important de la ration alimentaire des nourrissons et des jeunes enfants.

Les radionucléides mesurés dans le lait sont le césium, l'iode, le couple baryum-lanthane et les isotopes 89 et 90 du strontium. Ces radionucléides ont été émis lors des essais atmosphériques et sont caractérisés par des facteurs de transfert au lait de vache *via* l'alimentation du bétail élevé. C'est un indicateur pertinent des niveaux d'activité des produits alimentaires.

Lors de la période des essais, le lait pouvait être acheté directement aux producteurs et aux laiteries locales ainsi que sur le marché de Papeete.

Aujourd'hui, le lait local est acheté à une laiterie qui collecte le lait en provenance du plateau de Taravao à Tahiti (3 prélèvements de 10 litres par an). Le lait UHT, en provenance de métropole, est mesuré une fois dans l'année (10 litres).

III.4.3 – PRÉLÈVEMENTS EN DOMAINE MARIN

La surveillance radiologique des composantes physiques du domaine marin est réalisée à l'aide d'échantillons d'eau de mer, de matière en suspension (MES) et de sédiments. La composante biologique est suivie à l'aide d'échantillons d'algues planctoniques et benthiques, ainsi que d'espèces de coraux, de mollusques, de crustacés et de poissons, dont certaines entrent dans la ration alimentaire de la population polynésienne.

III.4.3.1 - EAU DE MER

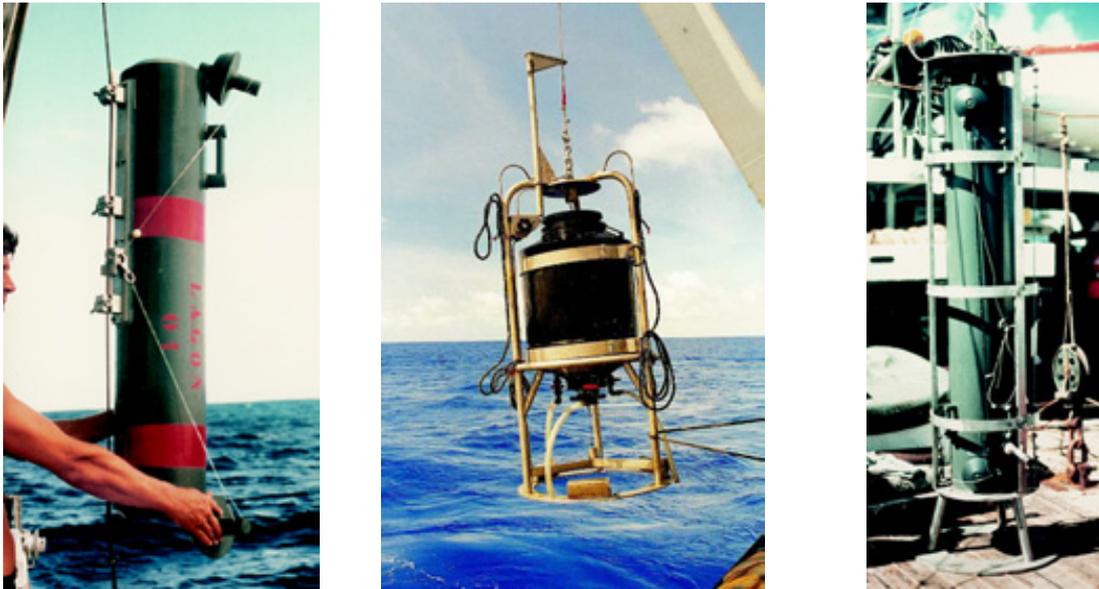
Les prélèvements d'eau de lagon sont effectués à l'aide de bouteilles hydrographiques de 35 litres. Les prélèvements océaniques, en surface ou en profondeur, sont réalisés au moyen de bouteilles de 100 litres *General Oceanics*, modèle 1080, et de bouteilles de 300 litres Néréides-Mécaboler (photos ci-dessous). Pour les prélèvements des eaux de surface, des pompes à refoulement Grindex, à grand débit, ont également été utilisées, comme ce fut le cas lors de l'exercice d'intercomparaison AIEA-Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)-SMSR, en 1991.

Les bouteilles de prélèvement sont réservées à une utilisation spécifique, soit pour le lagon, soit pour l'océan, afin d'éviter toute possibilité de pollution croisée des échantillons par le matériel de prélèvement. Leur fonctionnement est du type *Niskin*, sans retournement. Elles sont descendues en position ouverte, jusqu'à la profondeur voulue repérée par sonar ou poulie compteuse. La fermeture des bouteilles se fait par l'envoi d'un message (masse en laiton) depuis la surface.

Les prélèvements d'eau de surface sont réalisés à 5 m de profondeur, ou à 2 m lorsque la zone de prélèvement est peu profonde. Les volumes d'eau échantillonnés sont de 100 à 600 litres, pour les prélèvements océaniques, et de 30 à 200 litres, pour ceux des lagons.

Lors des essais atmosphériques, la localisation des points de prélèvements situés à l'intérieur des lagons s'effectuait à l'aide du système Trident (croisement de deux réseaux d'hyperboles).

À partir de la période des essais souterrains, les stations de prélèvements ont été localisées à l'aide d'un système de GPS différentiel (référence à des bornes topographiques), procurant une précision de l'ordre du mètre. La localisation précise des zones de prélèvements océaniques est réalisée au moyen du système de navigation du bateau Satnav ou GPS.



Mise à l'eau d'une bouteille de prélèvement d'eau de mer de type Niskin de 35 litres de volume (a) et d'une bouteille de 300 litres Néréides-Mécabolier (b). Bouteille de prélèvement d'eau de mer de la marque General Oceanics de 100 litres de volume (c).

L'eau de mer contenue dans les puits d'essai est collectée régulièrement à l'aide d'un dispositif dit «polytubes». Celui-ci est constitué de 12 tubes de 4 mm de diamètre assemblés dans une gaine périphérique. Ce «polytubes» était installé dans le FGD, lors de la descente du conteneur d'essai. Les tubes élémentaires débouchaient dans le forage à des profondeurs distinctes et prédéfinies, permettant de prélever de l'eau à différents niveaux, entre le sommet de la zone de bourrage et la surface. Une armoire contenait les pompes et les flacons de collecte des échantillons d'eau reliés, en surface, à l'extrémité des différents tubes de l'assemblage (Fig. 55).

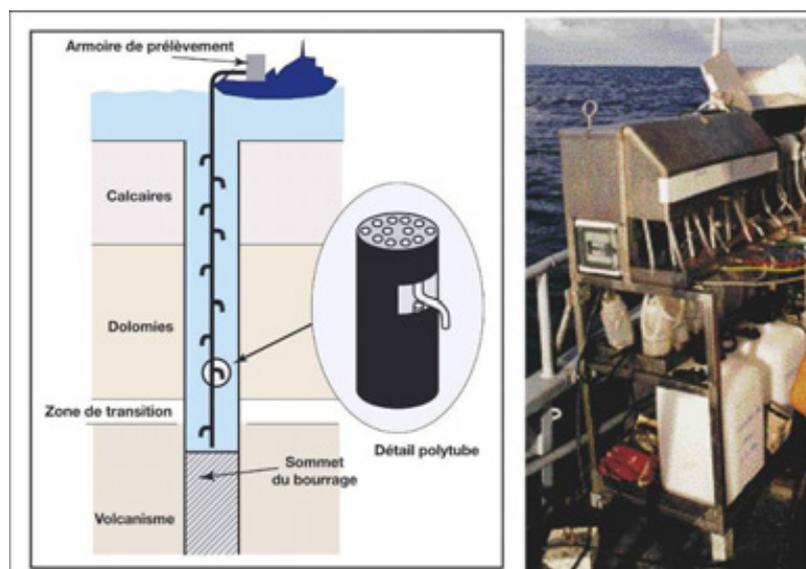


FIG. 55. – Schéma du dispositif dit «polytubes» et son armoire.

III.4.3.2 - SÉDIMENTS

Les sédiments superficiels, soit les 5 premiers centimètres, sont collectés en utilisant une benne *Shipeck* (Fig. 56a). Les échantillons nécessaires aux mesures de profils sédimentaires sont prélevés au moyen d'un carottier à gravité de type *Kulenberg* (Fig. 56b), permettant de réaliser des carottes pouvant atteindre un mètre de longueur. Les prélèvements sont effectués dans des zones sédimentaires localisées grâce à une caméra fixée sur le câble de manutention, au-dessus de la benne ou du carottier.

Au niveau des points zéro des essais réalisés sur barge au droit de la zone Dindon, un carottier enfoncé par battage à partir d'une embarcation a permis d'obtenir des échantillons d'environ 5 mètres de longueur.

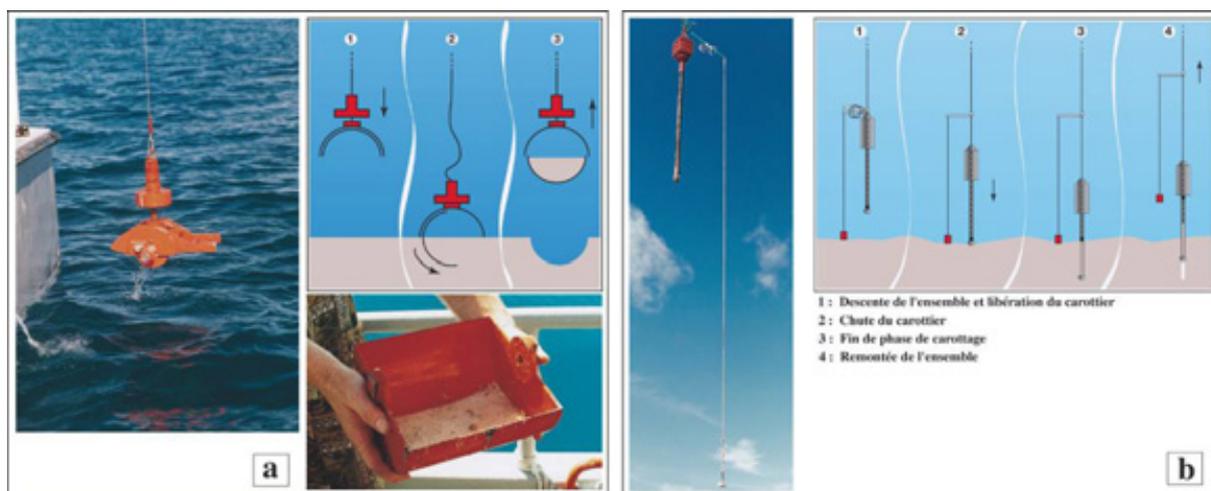


FIG. 56. - (a) : benne de prélèvement superficielle de sédiment, type *Shipeck* avec son principe de fonctionnement et son godet basculant rempli de sédiments. (b) : carottier *Kulenberg* pour prélèvement de sédiments en profondeur avec son principe de fonctionnement.

III.4.3.3 - PLANCTON

Le plancton des eaux océaniques polynésiennes est caractérisé par une faible biomasse et une richesse spécifique plus élevée que celle du plancton des lagons, caractérisé par une plus forte biomasse (cf. Chapitre I). Les difficultés pour collecter des masses suffisantes de plancton pour la mesure d'activité a conduit à définir deux protocoles d'échantillonnage, spécifiques des lagons et du domaine océanique.

Dans les lagons, la récolte du plancton s'effectue à l'aide de filets de forme cylindroconique de 1 m de diamètre d'ouverture, confectionnés en toile nylon à mailles dégradées. L'extrémité d'un filet est munie d'un collecteur en plastique percé de quatre rangées de trous (4 cm de diamètre) obstruées par du tissu nylon filtrant. Le trait planctonique est réalisé avec une embarcation légère de type hors-bord. Deux ou trois filets sont tractés simultanément en surface à une vitesse réduite, entre 1 et 2 nœuds, durant deux à trois heures.

En domaine océanique, la méthode de pêche systématiquement utilisée depuis 1990 afin de recueillir la biomasse planctonique nécessaire à l'ensemble des mesures, soit 500 g frais

minimum, est la suivante : cinq filets (surface d'ouverture 2 m², longueur 7 m, mailles dégressives 270, 140 et 75 µm) grésés sur le même câble tracteur sont mouillés à la tombée de la nuit, puis traînés horizontalement entre 10 et 50 m de profondeur, durant 6 heures, à allure réduite (1 à 1,5 nœud). Des appareils enregistreurs fixés à l'entrée des filets, permettent de contrôler *a posteriori* les volumes d'eau effectivement filtrés et les profondeurs d'immersion des filets (Fig. 57).

Au laboratoire, le contenu planctonique de chaque collecteur est passé sur deux tamis superposés, de mailles 4 000 et 75 µm. La fraction supérieure à 4 000 µm comprenant principalement des organismes gélatineux (méduses, salpes) est rejetée. La fraction 75 - 4 000 µm est recueillie pour être égouttée sur du papier absorbant durant 5 heures, puis pesée et ensuite desséchée en étuve à 80°C durant 72 heures.

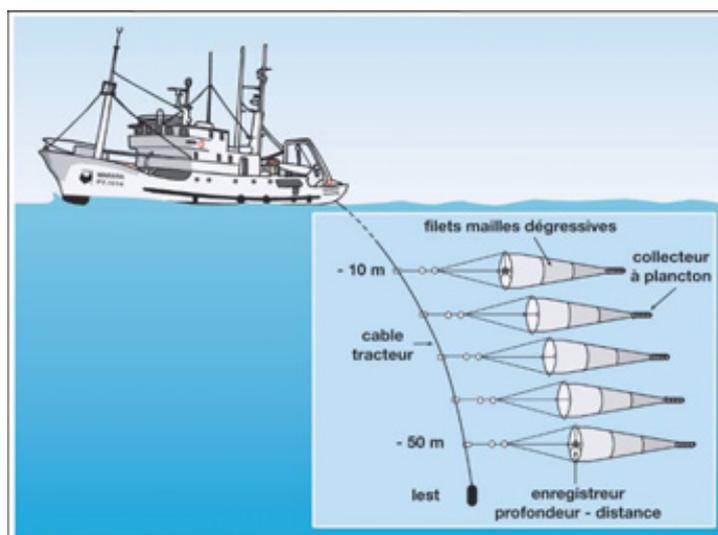


FIG. 57. – Gréement des filets à plancton lors des collectes en domaine océanique par le bâtiment de contrôle biologique Marara.

III.4.3.4 - ALGUES BENTHIQUES

Les algues sont peu nombreuses sur les fonds sableux des lagons polynésiens. Ceux de Mururoa et de Fangataufa n'échappent pas à cette règle. La végétation algale se présente principalement sous la forme de couvertures cotonneuses ou muqueuses, violacées ou rosées, dont la récolte en quantité suffisante pour l'analyse radiologique est difficile.

Entre 1970 et 1981, à Mururoa, les échantillons étaient uniquement constitués d'algues se développant sur leur substrat naturel. À partir de 1982, des substrats artificiels (collecteurs concentrateurs d'algues) ont été mis en place dans le lagon. Il s'agissait de panneaux en toile plastique de 5 m² de surface, immergés verticalement à différentes profondeurs (Fig. 58a). Le temps d'immersion d'environ 60 jours était suffisant pour permettre la croissance d'une quantité satisfaisante d'algues, sans pour autant permettre l'installation de trop nombreux animaux. Après relevage des panneaux, les échantillons d'algues étaient prélevés par raclage des deux faces du support.

Ce procédé original a permis de réaliser 1 350 échantillons d'algues répartis sur l'ensemble du lagon de Mururoa en fonction des zones à surveiller plus particulièrement (Fig. 58b).

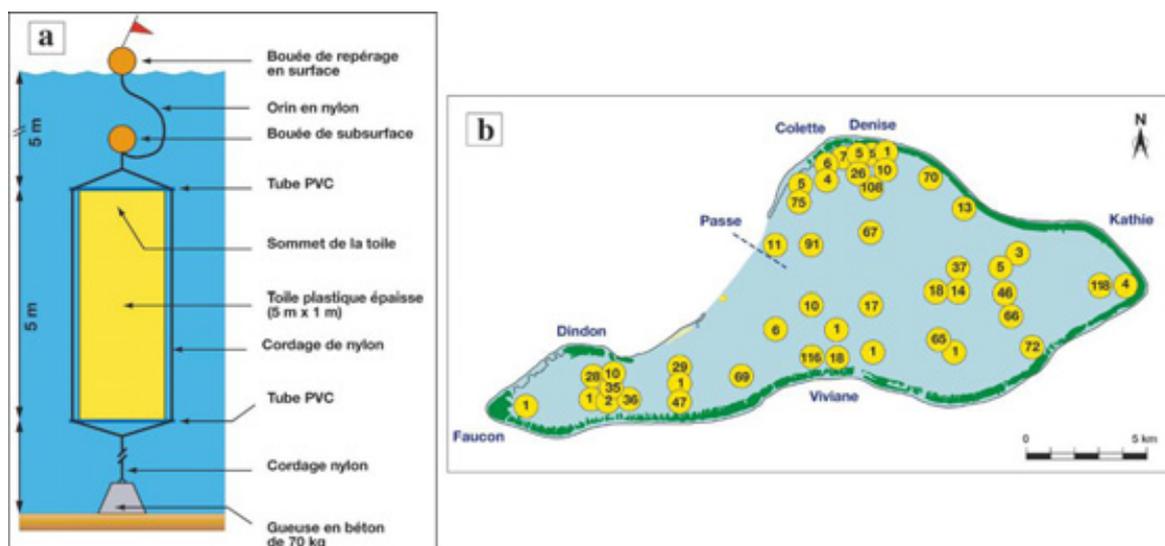


FIG. 58. – Schéma général du montage d'un collecteur concentrateur d'algues (a) et localisation des lieux de prélèvements et nombres d'échantillons d'algues récoltés par station, entre 1970 et 1997, dans le lagon de Mururoa (b).

III.4.3.5 - CORAUX

Plusieurs espèces de madréporaires ont fait l'objet d'analyses radiologiques dans les lagons de Mururoa et de Fangataufa : *Lobophyllia cost ata*, *Pocillopora verrucosa*, *Acropora pulchra*, *Po rites solida*, *Fungia paumotensis* et *Fungia fun gites*.

En raison de leur abondance dans le lagon de Mururoa, ces deux dernières espèces font l'objet d'un suivi régulier. Le corail champignon (*Fungia fun gites*), fixé lorsqu'il est jeune, est, à l'état adulte, libre de toute attache avec le substrat. Le corail champignon, comme les autres espèces de coraux, est carnivore et se nourrit de zooplancton.

La collecte des échantillons était effectuée par des plongeurs, en apnée ou en scaphandre autonome, selon la profondeur.

En moyenne, trois individus de 10 cm de diamètre sont nécessaires pour constituer un échantillon de 700 grammes. Cette espèce a fait l'objet de prélèvements réguliers, entre 1972 et 1997, dans les lagons de Mururoa et de Fangataufa. Les mesures étaient effectuées sur l'animal entier : squelette calcaire et partie vivante réunis.

III.4.3.6 - HOLOTHURIES

Seule l'holothurie noire, de l'espèce *Holothuria atra*, est prélevée. Elle vit sur le sable au fond du lagon et se nourrit en ingérant et filtrant le sédiment. Elle est parfois consommée localement.

Pour chaque échantillon, les animaux sont fendus longitudinalement pour être débarrassés de leurs viscères. Seuls les téguments sont conservés pour l'analyse radiologique, jusqu'à obtention d'une masse de 1,5 kg. L'holothurie a fait l'objet d'une surveillance radiologique régulière, dans les lagons de Mururoa et de Fangataufa, de 1967 à 1997.



Funaria funigites



Holothurie noire (Holothuria atra) dans son habitat.

III.4.3.7 - MOLLUSQUES

Les prélèvements réguliers d'échantillons de mollusques des atolls de la Polynésie, y compris sur les atolls d'expérimentations, concernent les quatre espèces suivantes :

- le **bénitier** (*Tridacna maxima*), mollusque bivalve lamellibranche, est une espèce commune des lagons des atolls fermés. Une algue photosynthétique (zooxanthelle) vit en symbiose dans les tissus de son manteau. Le bénitier filtre de grandes quantités d'eau de mer pour se nourrir des débris organiques en suspension dans l'eau, du zooplancton et du phytoplancton dont le facteur de concentration des radionucléides est très élevé. Il constitue donc l'indicateur de choix pour suivre l'évolution de l'activité des eaux des lagons, même à des niveaux très faibles ;

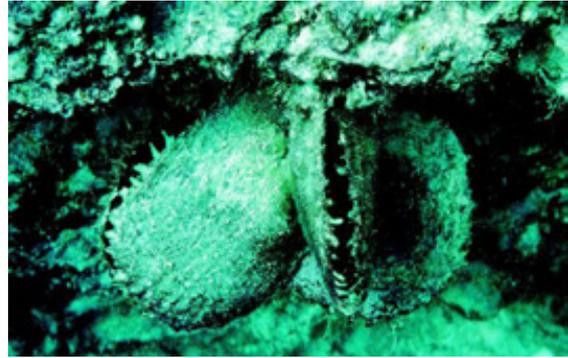
Pour chaque prélèvement, une vingtaine de bénitiers adultes, de taille supérieure à 12 cm, sont extraits de leur gangue corallienne. Les deux valves de l'animal sont écartées afin d'en séparer les parties molles. La membrane qui recouvre les viscères est incisée pour permettre l'ablation de l'hépatopancréas. Les deux fractions ainsi obtenues, hépatopancréas (200 g en moyenne) et parties comestibles (1 200 g en moyenne), sont analysées séparément. Entre 1975 et 1995, environ 500 prélèvements ont été réalisés dans les lagons de Mururoa et de Fangataufa.

- la **nacre ou pintadine à lèvres noire** (*Pinctada margaritifera*), mollusque bivalve filtreur, est une espèce rencontrée dans tout l'Indo-Pacifique intertropical. Cette nacre, en particulier aux Tuamotu, est utilisée pour la perliculture depuis 1968 (atoll de Manihi). Elle vit jusqu'à une profondeur d'une soixantaine de mètres, fixée par son byssus sur les substrats coralliens qui constituent son biotope dans le lagon des atolls ;

Dans le lagon de Fangataufa, la nacre est suffisamment abondante pour permettre une surveillance radiologique régulière, alors qu'elle est beaucoup plus clairsemée dans le lagon de Mururoa. Chaque échantillon est constitué d'environ 350 g de chair.



Bénéitier (Tridacna maxima).



Nacres (Pinctada margaritifera).

- le **troca** (*Trochus niloticus*) est un gastéropode herbivore brouteur des gazons d'algues se développant sur des supports naturels (platier récifal, pâtés de coraux du lagon) ou artificiels (coques de navires...);

Chaque prélèvement se compose d'environ 50 individus. La masse viscérale (hépatopancréas, tube digestif, branchies, gonades etc.) est séparée de la chair (muscle du pied). Les deux fractions ainsi obtenues, viscères d'un côté (750 g en moyenne) et chair de l'autre (1 350 g en moyenne) sont soumises séparément à l'analyse. Depuis 1983, date à laquelle la population de trocas importée dans le lagon de Mururoa est devenue suffisamment importante pour envisager une surveillance de la radioactivité de cette espèce, environ 170 prélèvements ont été effectués. Dans le lagon de Fangataufa, ce n'est qu'en 1991 que la population de trocas est devenue suffisante pour permettre des prélèvements sans l'appauvrir.

- le **turbo soyeux** (*Turbo setosus*) est un gastéropode herbivore (gazons d'algues) très répandu. Il vit sur la crête algale du récif extérieur en milieu très battu par les vagues. Le *Turbo setosus* ou *maua* en tahitien était autrefois une espèce dont le pied musculueux était consommé en Polynésie française. Elle l'est encore sur la plupart des atolls des Tuamotu et cause parfois des intoxications alimentaires rappelant la *ciguatera*.



Troca (Trochus niloticus).



Turbo soyeux (Turbo setosus).

À chaque prélèvement, une centaine de turbos est ramassée à la main, de jour, quand la marée est basse. La masse viscérale (hépatopancréas, tube digestif, branchies, gonades etc.) et la chair (muscle du pied) sont extraites de la coquille. Les deux fractions ainsi obtenues, viscères (650 g en moyenne) et chair (1 500 g en moyenne) sont analysées séparément. Entre 1968 et 1993, au titre de la surveillance radiologique, des stations ont été choisies dans des zones représentatives du récif externe des atolls de Mururoa (15) et de Fangataufa (14) où plus de huit cents prélèvements de turbos ont été effectués (Fig. 59).

La collecte des échantillons des différentes espèces de mollusques est effectuée par des plongeurs en apnée ou en scaphandre autonome, selon la profondeur.

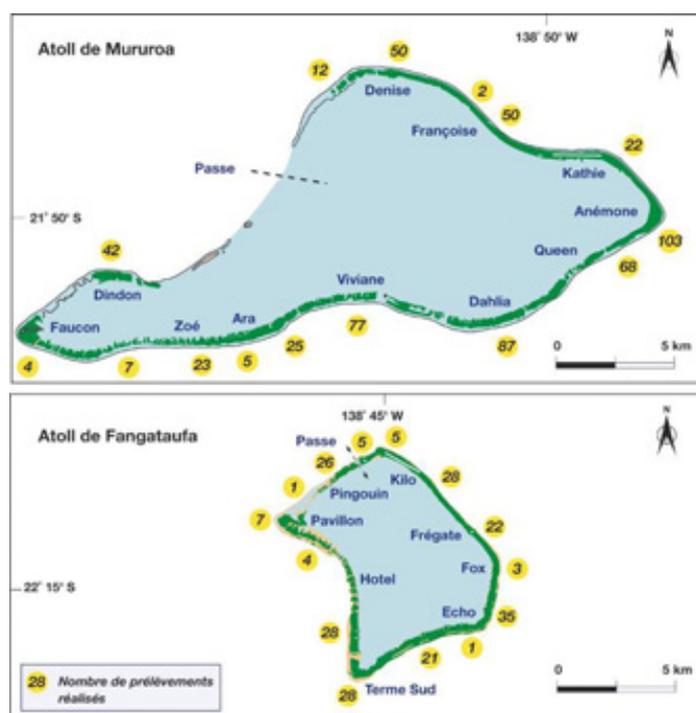


FIG. 59. – Localisation des stations de prélèvements et nombre d'échantillons de turbos prélevés sur le pourtour des récifs externes des atolls d'expérimentations de Mururoa et Fangataufa.

III.4.3.8 - CRUSTACÉS

Cinq espèces de langoustes sont connues en Polynésie française. Elles constituent un complément alimentaire apprécié des populations vivant en Polynésie. L'espèce *Panulirus penicillatus* est la plus commune des atolls de Mururoa et Fangataufa et de l'archipel des Tuamotu Est. Les langoustes habitent surtout la pente océanique externe, jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Elles se nourrissent de petits invertébrés, vers, mollusques ou échinodermes et occasionnellement de cadavres ou de débris organiques. Elles sont ramassées à la main, à marée montante, lors de leurs incursions nocturnes sur le platier récifal. Pour chaque échantillon, 10 à 12 individus sont collectés pour obtenir la quantité de chair nécessaire à la mesure (3 kg).



Langouste (Panulirus penicillatus).

III.4.3.9 - POISSONS

Les poissons prélevés dans le cadre de la surveillance radiologique appartiennent soit aux espèces vivant dans le lagon ou le platier externe, soit aux espèces pélagiques océaniques. Quatre d'entre elles sont pêchées dans le cadre de la surveillance radiologique :

- le poisson chirurgien (*Ctenochaetus striatus*) est le plus commun des poissons du lagon. Il constitue une espèce de choix pour la surveillance radiologique car, herbivore, il se nourrit d'algues filamenteuses. Il est sédentaire et très abondant dans toutes les zones ;
- le poisson perroquet (*Scarus sp.*) est également sédentaire, présent dans tous les massifs coralliens. C'est un poisson herbivore (algues) ;



Chirurgien (Ctenochaetus striatus).



Perroquet (Scarus gibbus).

- le surmulet (*Mulloidichthys flavolineatus*) est un carnivore se nourrissant des petits invertébrés benthiques vivant dans le sable. Il vit en bancs, parfois importants, mêlé à d'autres espèces de poissons, entre les pâtés coralliens et sur les platiers ;
- les mérours (*Cephalopholis argus*, *Plectropomus leopardus*, *Epinephelus microdon*, *Epinephelus merra*) sont des poissons carnivores. Ils se nourrissent de langoustes, de crabes, de crevettes et de poissons pouvant atteindre de grandes tailles.



Banc de surmulets (Mullolidichthys flavolineatus).



Mérou céleste (Cephalopholis argus).

La pêche est effectuée au moyen de fusils sous-marins, par des plongeurs en apnée ou en scaphandre autonome, selon la profondeur. Les poissons sont écaillés, puis leur cavité abdominale est ouverte afin de la vider de ses viscères (tube digestif, foie, gonades etc.). Elle est ensuite rincée à l'eau douce pour enlever toutes les salissures dues au contenu digestif. En moyenne, 2 à 3 kg de poissons (de l'ordre de 5 à 7 individus) éviscérés (ou de chair) sont nécessaires pour la mesure.

Les poissons de haute mer, pélagiques océaniques, pêchés dans le cadre de la surveillance radiologique appartiennent principalement aux genres bonite, thon, thazard et espadon (cf. Chapitre I, Fig. 20). Ils sont pêchés, soit en surface par des lignes de traîne, soit en profondeur, à l'aide de longues lignes ou palangres dérivantes. Une ou deux fois par an dans chaque île, la quasi-totalité des poissons était pêchée par les navires océanographiques *BRO La Coquille*, jusqu'en 1972, puis par le *BCB Marara*, selon deux techniques, la pêche à la traîne et la pêche à la longue ligne (ou palangre dérivante japonaise).

Pour la pêche à la traîne, le gréement consiste en deux tangons de 10 m, portant chacun trois lignes de 70, 60 et 50 m de long. Une à trois lignes supplémentaires peuvent être fixées sur le tableau arrière du navire. Chaque ligne est armée d'un hameçon double, appâté d'un leurre artificiel. Les lignes sont remorquées en surface, derrière le navire, à une vitesse de 7 à 8 nœuds, à quelques centaines de mètres des côtes ou sur les hauts fonds.

La pêche à la longue ligne est une technique de pêche utilisée principalement pour la capture des thons hauturiers (Fig. 60). Une ligne principale est constituée, vers le bas, des avançons, supports des hameçons et, vers le haut, des orins reliés aux flotteurs et aux pavillons. La ligne principale est divisée en plusieurs unités, toutes identiques, appelées *baskets* sur lesquelles sont grées six avançons. La longue ligne de 20 à 40 *baskets*, de 7 à 14 km, est mouillée au large, généralement au cours de la nuit, et dérive librement entre deux eaux. Les hameçons sont appâtés au *Cololabis saira*, sardine importée du Japon sous forme congelée. La longue ligne est relevée dix heures plus tard, à l'aide d'un treuil spécifique.

Entre 1967 et 1993, ce sont essentiellement des thazards, des thons albacore et patudo qui ont été pêchés (Fig. 61). Des échantillons de chair de ces poissons, d'environ 3 kilos, étaient préparés de la même façon que celle des poissons de lagon, pour réaliser les mesures de radio-activité.

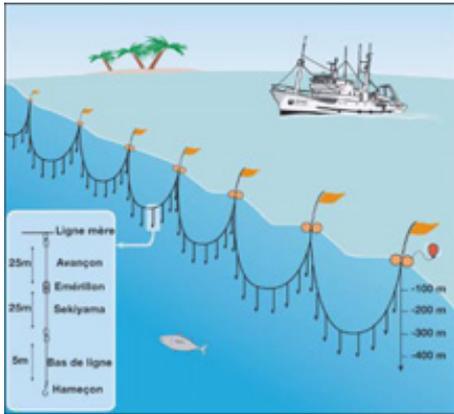


FIG. 60 - Schéma de longue ligne utilisée à bord du BCB Marara, avec le détail d'un avançon.

Le Bâtiment de contrôle biologique (BCB) Marara en cours de pêche à la traîne (tangons déployés).

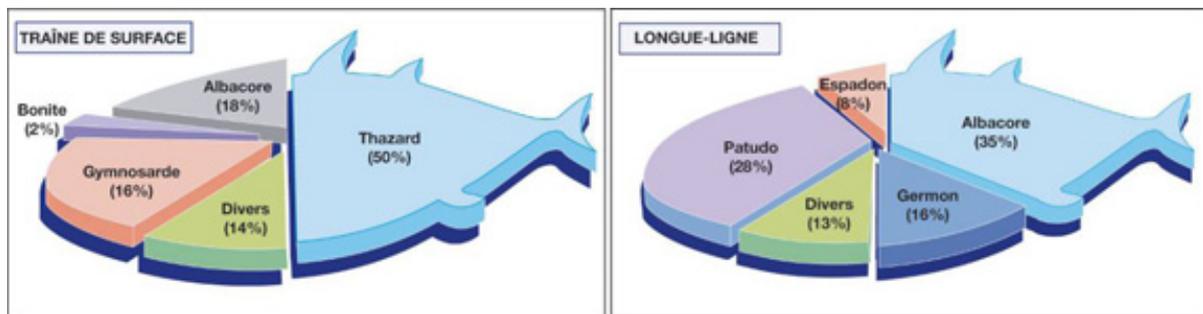


FIG. 61. – Composition relative (%) des captures de poissons pélagiques océaniques, selon les deux techniques de pêche utilisées par le BCB Marara, entre 1967 et 1993.

III.5 - MESURES DE LA RADIOACTIVITÉ

Les mesures de l'activité des différents radionucléides présents dans les échantillons sont brièvement présentées dans ce paragraphe, en fonction des matrices environnementales faisant l'objet de la surveillance radiologique.

III.5.1 - AÉROSOLS ATMOSPHÉRIQUES

Dans le cadre de la surveillance de la radioactivité atmosphérique, les mesures sont de deux types :

- Chaque filtre fait l'objet d'une mesure des indices alpha global et bêta global immédiatement après son retrait du filtre puis, successivement, trois jours et cinq jours après la fin du prélèvement. Ce délai d'attente permet de s'affranchir de l'activité des radionucléides naturels de période courte et, donc de pouvoir détecter toute activité d'origine artificielle significativement supérieure au bruit de fond des radionucléides émetteurs naturels à vie longue.
- Pendant la période des essais souterrains, la recherche systématique des radionucléides d'origine artificielle (^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$) à des niveaux d'activité très faibles a conduit à regrouper les filtres utilisés pendant un mois, voire un trimestre. Les mesures par

spectrométrie gamma étaient réalisées dans un environnement à très bas bruit de fond, dans les installations du SMSR, au laboratoire souterrain de Modane. Les isotopes du plutonium étaient mesurés par spectrométrie alpha, après traitement radiochimique de l'ensemble des filtres, utilisés durant un mois ou un semestre.

Pendant la période des essais atmosphériques, les résultats des mesures réalisées en routine étaient utilisés pour vérifier le respect des règles de radioprotection, sur la base des recommandations du rapport n°26 de la CIPR définissant les valeurs des concentrations maximales admissibles (CMA) dans l'air (cf. Chapitre VI). Les résultats des mesures alpha obtenus sur les filtres étaient ainsi comparés aux CMA du ^{239}Pu et les résultats des mesures des radionucléides émetteurs bêta du mélange non fractionné des produits de fission, ces derniers évoluant en fonction de l'âge du mélange, étaient comparés aux CMA 40-168 h (cf. Chapitre VI).

Dès les années 80, l'activité volumique des radionucléides d'origine artificielle initialement présents dans l'atmosphère, aux niveaux local et mondial, avait fortement décru. Néanmoins, les préoccupations environnementales ont amené à modifier les techniques de mesure pour s'assurer du confinement des radionucléides dans le massif géologique. De nouveaux protocoles de prélèvement (grands volumes) et de mesure ont été définis afin d'améliorer très sensiblement les limites de détection et de réduire les incertitudes de mesure (Tableau 11).

III.5.2 - EAUX DE MER

La surveillance de la radioactivité des eaux de mer a évolué au fil des ans, en fonction des techniques de mesure, en privilégiant la quantification de l'activité volumique des radionucléides ayant les périodes les plus longues tels le $^{239+240}\text{Pu}$, le ^{137}Cs et le ^{90}Sr . Ces derniers représentent aujourd'hui la quasi-totalité de l'activité résiduelle des essais atmosphériques. Ces échantillons après une filtration à 0,45 μm de porosité font l'objet de mesures des radionucléides associés à la fraction particulaire insoluble et de ceux associés à la fraction non particulaire soluble.

Dès les premiers essais sur barge, les isotopes du plutonium ont été mesurés dans les eaux des lagons, après filtration et séparation radiochimique. À partir de 1983, l'ajout systématique d'un traceur, le ^{236}Pu , à chaque échantillon a permis de déterminer le rendement des séparations chimiques de chaque analyse, afin de réduire l'incertitude des résultats. Avant cette date, un rendement moyen de 56 %, déterminé à partir d'un grand nombre de mesures sur des échantillons d'eau de mer marqués au ^{239}Pu , était appliqué uniformément à l'ensemble des analyses.

Le ^{137}Cs a été systématiquement recherché à partir du début des années 1980, par l'utilisation de cartouches de ferrocyanure de cobalt et de potassium ou de ferrocyanure de cuivre qui ont permis de traiter de grands volumes d'eau afin d'abaisser les limites de détection. Le ^{90}Sr a été analysé de façon régulière à partir de la fin des années 1980, en adoptant le protocole opératoire du laboratoire hydrographique allemand de Hambourg. À la même époque, le tritium (sous forme HTO), considéré comme un précurseur d'un éventuel relâchement des radio nucléides d'une cavité-cheminée, a été suivi de manière systématique.

Les eaux océaniques, au plus près des flancs des atolls de Mururoa et de Fangataufa, ont été étudiées, conformément aux recommandations de la mission menée par Haroun Tazieff, en 1982.

Tableau 11. Caractéristiques des méthodes de mesure utilisées en 1995, pour quantifier les différents radionucléides au sein des différentes matrices environnementales prélevées en Polynésie.

| Nature de l'échantillon analysé | Élément recherché (Prise d'essai) | Type et durée de la préparation | Type et durée du comptage | Limite de détection LD | Type de l'appareillage de mesure |
|---------------------------------|---|--|--|---|---|
| Sols | Émetteurs γ (500ml) | Étuvage, broyage, (2h à plusieurs jours) | Spectrométrie γ 4000min | $^{40}\text{K} = 1 \text{ Bq.kg}^{-1}$ $^{137}\text{Cs} = 0.1 \text{ Bq.kg}^{-1}$ | Semi-conducteur Germanium |
| Sable | Pu - Am Émetteurs X (10g) | Mse en solution Séparation sur résine (15 jours) | Spectrométrie α, X 4000min | 0.02 Bq.kg^{-1} | Semi-conducteur Silicium |
| Sédiments | ^{90}Sr (10g) | Mse en solution et extraction (4 jours) | Comptage β Décroissance ^{90}Y 100min | 2 Bq.kg^{-1} | Compteur proportionnel bas bruit de fond |
| Faune | α global (250mg) | Étuvage, broyage, et dépôt (40min) | Comptage α 100min | 140 Bq.kg^{-1} | Scintillation SZn |
| Flore | β totaux (250mg) | Étuvage, broyage, et dépôt (40min) | Comptage β 100min | 350 Bq.kg^{-1} | Compteur proportionnel |
| Tous Solides | | | | | |
| | ^{137}Cs (300 litres) | Concentration, passage sur résine (2 jours) | Spectrométrie γ | $10^{-2} \text{ Bq.m}^{-3}$ | Semi-conducteur Germanium |
| | Pu - Am (300 litres) | Precipitation $\text{Fe}(\text{OH})_3$ purification, électrodéposition | Spectrométrie α 4000min | $2 \cdot 10^{-4} \text{ Bq.m}^{-3}$ | Chambre à grille ou détecteur silicium |
| | ^{90}Sr (200 litres) | Extraction (1 jour) | Comptage β Décroissance ^{90}Y 100min | $10^{-1} \text{ Bq.m}^{-3}$ | Compteur proportionnel bas bruit de fond |
| Eau de mer | | | | | |
| Eau douce | Eau tritiée (250ml) | Distillation et enrichissement électrolytique (4 jours) | Comptage β 300min | 120 Bq.m^{-3} | Scintillation liquide |
| | Eau tritiée (10ml) | Distillation (1 heure) | Comptage β 100min | 10^3 Bq.m^{-3} | Scintillation liquide |
| | α, β global eau de mer (20ml) Eau douce (200ml) | Évaporation sur coupelle (1 heure) | Comptage α, β 100min | Eau de mer $\alpha = 3 \text{ Bq.m}^{-3}$ $\beta = 3 \text{ Bq.m}^{-3}$ Eau douce $\alpha = 0.15 \text{ Bq.m}^{-3}$ $\beta = 0.40 \text{ Bq.m}^{-3}$ | • Compteur α à scintillation (SZn) • Compteur proportionnel |
| | | | | | |
| | Pu (80000m ³ par mois) | Mse en solution, traçage, séparation électrodéposition | Spectrométrie α 4000min | $10^{-8} \text{ Bq.m}^{-3}$ | Chambre à grille |
| | Cs (4.4.10 ⁵ m ³ par semestre) | Mse en solution, traçage, séparation électrodéposition | Spectrométrie γ 10000min | $2 \cdot 10^{-8} \text{ Bq.m}^{-3}$ | Spectrométrie γ (GeHP) |
| Aérosols atmosphériques | α, β global (2400m ³ journalier) | Mesure directe sur filtres | Comptage α, β 100min | $\alpha = 1.10^{-5} \text{ Bq.m}^{-3}$ $\beta = 4.10^{-5} \text{ Bq.m}^{-3}$ | • Compteur α à scintillation (SZn) • Compteur proportionnel |

III.5.3 - ÉCHANTILLONS BIOLOGIQUES

III.5.3.1 - CONDITIONNEMENT DES ÉCHANTILLONS

La plupart des échantillons marins sont disséqués afin d'obtenir les fractions nécessaires aux analyses radiologiques (Tableau 12). Ainsi, un même échantillon peut fournir plusieurs sous-échantillons ou fractions : chair, viscères, tégument, etc. Dès sa réalisation, l'échantillon (ou la fraction) est pesé, puis identifié par un numéro individuel. Depuis 1992, l'échantillon est reconnu par code-barres. Les informations qui lui sont associées : nature, lieu ou zone, coordonnées géographiques, conditions particulières de prélèvement etc., font l'objet d'une saisie dans une base de données informatique. Une trace écrite de ces informations est systématiquement conservée sous forme de fiches de prélèvement. Le conditionnement des échantillons pour leur transport et leur entreposage avant mesure est réalisé en sacs thermo-soudés, étanches et conservés à -30 °C.

III.5.3.2 – PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

L'analyse des radionucléides d'origine artificielle s'effectue, dans la majorité des cas, sur des cendres, après calcination des échantillons. La recherche des éléments volatils comme les iodes fait l'objet d'une mesure sur l'échantillon à l'état frais.

Les espèces prélevées, représentent des matrices très différentes les unes des autres, caractérisées par un taux de dessiccation ou de calcination très variable. Pour chaque espèce, la quantité de matière à prélever est déterminée de façon à disposer, pour la mesure radiologique, d'une masse finale d'environ 50 g de cendres. La masse de matière initiale varie entre une centaine de grammes (coraux, par exemple) et plusieurs kilogrammes (feuilles, coprah, mollusques, crustacés, chair de poissons etc.).

III.5.3.3 - MESURES DES ÉCHANTILLONS

Une fois broyées et homogénéisées, les cendres blanches obtenues par minéralisation font l'objet d'une première mesure des radionucléides émetteurs gamma, directement par spectrométrie gamma. Tous les radionucléides émetteurs gamma émettant entre 0 et 2 MeV, comme le ^{40}K (radionucléide d'origine naturelle), le ^{137}Cs ou le ^{60}Co (radionucléide d'origine artificielle), sont quantifiés sur les cendres conditionnées dans une boîte cylindrique ayant une géométrie normalisée. Au cours du temps, l'amélioration des équipements en métrologie nucléaire a permis l'utilisation de détecteurs de plus en plus sensibles :

- détecteurs à cristal d'iodure de sodium activé au thallium (NaI Tl) ;
- détecteurs à jonction de germanium-lithium GeLi (milieu des années 1970) ;
- détecteurs à jonction de germanium haute pureté GeHp (début des années 1980).

L'analyse radiochimique des radionucléides émetteurs alpha et bêta pur est ensuite réalisée sur des parties aliquotes de cendres, variant entre 1 et 10 grammes. Les radionucléides émetteurs bêta pur (^{90}Sr) et alpha ($^{239+240}\text{Pu}$) ne sont pas systématiquement recherchés dans tous les échantillons. Généralement, deux échantillons sur trois font l'objet d'une analyse complète.

Le ^{90}Sr est isolé à partir des cendres d'échantillon après leur mise en solution acide et une précipitation des oxalates. Le précipité est mesuré à l'aide de compteurs proportionnels à circulation de gaz.

Tableau 12. Fraction des espèces végétales et animales prélevées sur les atolls d'expérimentations de Mururoa et de Fangataufa faisant l'objet de mesures.

| Niveau trophique | Nom commun | Nom scientifique | Fraction prélevée |
|---------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Producteurs | Algues | | Entière |
| Herbivores | Plancton | | Entier |
| | Mollusques gastropodes | | |
| | Trocas | <i>Trochus niloticus</i> | Chair Viscères |
| | Turbos | <i>Turbo setosus</i> | Chair Viscères |
| | Mollusques bivalves | | |
| | Bénitiers | <i>Tridacna ma ima</i> | Parties comestibles |
| | Chames | <i>Chama iostoma</i> | Hépatopancréas |
| | Arches | <i>Arca ventricosa</i> | Parties molles |
| | Petites huitres | <i>Inctada maculata</i> | Parties molles |
| | Grandes huitres | <i>Inctada margaritifera</i> | Parties molles |
| Poissons | | | |
| Chirurgiens | <i>Ctenochaetus striatus</i> | Éviscéré | |
| Perroquets | <i>Scarus gibbus</i> | Éviscéré | |
| Carnivores | Coraux | | |
| | <i>Acropora</i> | <i>Acropora pulchra</i> | Entier |
| | <i>ocillopora</i> | <i>ocillopora verrucosa</i> | Entier |
| | <i>Fungia</i> | <i>Fungia fungites</i> | Entier |
| | <i>Lobophyllia</i> | <i>Lobophyllia costata</i> | Entier |
| | Poissons | | |
| | Surmulets | <i>Uloidiichthys flavolineatus</i> | Éviscéré |
| | Mollusques octopodes | | |
| | Pieuvres | <i>Cephalopolis argus</i> | Entier |
| | Poissons mérous | <i>Plinephelus merra</i> | Éviscéré |
| Détritivores | Echinodermes | | |
| | Holothuries noires | <i>Cloothuria atra</i> | Tégument Contenu digestif |

| Profondeur de pêche | Nom courant | Nom scientifique | Nature de la fraction analysée |
|---------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Surface | Bonite ou listao | <i>atsunus pelamis</i> | Chair |
| | Thon à dents de chien | <i>Gemmosarda unicolor</i> | Chair |
| | Thazard | <i>Acanthocyttus maculatus</i> | Chair |
| | Jeune thon albacore | <i>Thunnus albacares</i> | Chair |
| | Jeune thon patudo | <i>Thunnus obesus</i> | Chair |
| 100 à 200m | Thon albacore | <i>Thunnus albacares</i> | Chair |
| 300 à 400m | Thon germon | <i>Thunnus alalunga</i> | Chair |
| 300 à 400m | Thon patudo | <i>Thunnus obesus</i> | Chair |

| Niveau trophique | Profondeur | Moyen de capture | Nom courant | Nature de la fraction analysée |
|----------------------------|--------------------|--------------------|-------------|--------------------------------|
| Herbivores | 10 à 50m | Trait à plancton | Plancton | Entier |
| Carnivores | 200 à 350m | Palangre profonde | Mérou | Chair |
| | " | Palangre profonde | Loche | Chair |
| | " | Palangre profonde | Lutjan | Chair |
| | " | Palangre profonde | Bec de cane | Chair |
| | " | Palangre profonde | Vivaneau | Chair |
| | 400 à 500m | Filière de casiers | Murène | Éviscéré |
| " | Filière de casiers | Congre | Éviscéré | |
| Carnivores détritivores | 150 à 200m | Dragage | Ophiure | Entière |
| | " | Dragage | Gorgone | Entière |
| | 300 à 1200m | Filière de casiers | Anémone* | Entière |
| | | Filière de casiers | Pagure | Entier |
| | | Filière de casiers | Crevette | Entière |
| | | Filière de casiers | Crabe | Entier |
| Filière de casiers | Autres crustacés | Entier | | |

*: Anémone symbiotique du pagure.

Les isotopes du plutonium sont isolés par une séparation chimique sélective, après incorporation de traceurs (^{236}Pu et ^{242}Pu) dans l'échantillon, suivie d'une chromatographie sur résines échangeuses d'ions, puis d'une électrodéposition sur disque en acier inoxydable. La quantification des isotopes émetteurs alpha du plutonium est effectuée à l'aide de chambres d'ionisation à circulation de gaz (chambres à grille), de détecteurs semi-conducteurs au silicium ou de détecteurs à barrière de surface.

Quels que soient les échantillons, les résultats sont toujours exprimés en becquerels par kilogramme (ou par litre) de produit frais, ramenés à la date du prélèvement de l'échantillon.

III.6 - EXERCICES D'INTERCOMPARAISON

La participation des laboratoires de mesure à des exercices d'intercomparaison (également appelés essais d'aptitude interlaboratoires) est indispensable pour valider les résultats de mesure obtenus sur les échantillons provenant du programme de surveillance de la radioactivité de l'environnement. Ces exercices permettent de vérifier la validité du programme et la qualité des laboratoires, en particulier lorsqu'il s'agit de mesurer des traces de radioactivité dans des matrices environnementales ayant des compositions élémentaires variées. Ces exercices consistent à partager l'échantillon issu d'un même prélèvement en plusieurs fractions équivalentes, aliquotes, qui sont ensuite mesurées par des laboratoires mondialement reconnus pour la qualité de leurs résultats afin de comparer les résultats obtenus.

Depuis 1981, tous les laboratoires de mesure du CEA impliqués dans la surveillance radiologique ont régulièrement participé aux exercices d'intercomparaisons nationaux organisés par le Service central de protection contre les rayonnements ionisants (SCPRI), puis par l'Office de protection contre les rayonnements ionisants (Opri) et l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), laboratoire de mesure de référence de l'Organisation mondiale de la santé.

En 1983, une première délégation de scientifiques étrangers a prélevé des échantillons sur l'atoll de Mururoa. La mission était constituée de scientifiques de pays du Pacifique Sud : Australie, Nouvelle-Zélande et Papouasie-Nouvelle Guinée. Le Professeur Atkinson, directeur du National Radiation Laboratory de Christchurch, en Nouvelle-Zélande, dirigeait cette mission durant laquelle des échantillons de mollusques, d'algues, de coraux, de poissons, de plancton, de végétaux, de sols, d'eaux du lagon et d'eaux océaniques ont été prélevés pour mesure de leur radioactivité par les différents laboratoires.

Pendant la campagne d'essais de 1987, la Fondation Cousteau, assistée de laboratoires de l'École normale supérieure, a réalisé de nombreux prélèvements d'échantillons de l'atoll de Mururoa pour mesure de leur radioactivité.

En 1991, un exercice d'intercomparaison a été organisé à la demande de la Direction des centres d'expérimentations nucléaires (Dircen), auquel ont participé des scientifiques de l'AIEA et des États-Unis. Portant sur trois échantillons d'eau de mer et deux échantillons de plancton, cette intercomparaison avait pour but de déterminer les niveaux de radioactivité naturelle et artificielle dans l'océan, à proximité des deux sites d'expérimentations.

En 1996-1997, lors de la fermeture du CEP, à la demande de la France, l'AIEA a réalisé une expertise complète de l'état radiologique des atolls de Mururoa et de Fangataufa, à partir des résultats de mesures de l'activité des différentes composantes de l'environnement ayant fait l'objet d'une campagne de prélèvements spécifiques. Ces résultats ont été comparés à ceux obtenus dans le cadre de la surveillance de routine du site et ont fait l'objet d'une publication détaillée, éditée en 1998 (cf. Chapitre VII).

III.6.1 - EXERCICE D'INTERCOMPARAISON AIEA-PLANCTON

L'exercice d'intercomparaison organisé par l'AIEA en 1991 a porté sur la mesure de l'activité massique d'échantillons de plancton océanique, récoltés au large des atolls de Mururoa et de Fangataufa. Compte tenu de la difficulté à prélever les masses d'échantillons (300 g frais) nécessaires aux mesures des traces de radionucléides, seuls trois laboratoires de mesure ont participé à cet exercice : le laboratoire du SMSR, l'*International laboratory of marine radioactivity* de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA/Monaco) et le *Lawrence Livermore national laboratory (LLNL/Californie)*. Les échantillons étaient issus de six traits planctoniques, effectués à la périphérie des eaux territoriales, au moyen de six filets traînés pendant 6 heures. Les trois premiers (plancton n° 1) ont été réalisés à 24 milles nautiques à l'Est des côtes de Mururoa et de Fangataufa, les trois autres (plancton n° 2) à 12 milles nautiques à l'Ouest.

Les trois laboratoires ont obtenu des résultats cohérents (Tableau 13). Les seuls radionucléides artificiels détectés sont caractérisés par des périodes longues : ^{137}Cs , ^{238}Pu et $^{239+240}\text{Pu}$, alors que le ^{60}Co , de période plus courte, n'était plus quantifiable. Les activités massiques de ces radionucléides dans le plancton prélevé en 1991 relevaient de la mesure de traces de radioactivité, confirmant la qualité des mesures réalisées par le SMSR et les valeurs obtenues lors des campagnes de surveillance.

Tableau 13. Résultats de l'exercice d'intercomparaison sur la mesure des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) des radionucléides d'origine artificielle présents dans deux séries d'échantillons de plancton océanique prélevées, en 1991, au large des atolls de Mururoa et Fangataufa.

| Lieu | Plancton 1 | | | Plancton 2 | | |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Est de Mururoa et de Fangataufa | | | Ouest de Mururoa et de Fangataufa | | |
| Laboratoires | AIEA | LIVERMORE | SMSR | AIEA | LIVERMORE | SMSR |
| ^{137}Cs | $\leq 0,06$ | $0,030 \pm 0,009$ | $\leq 0,06$ | $\leq 0,06$ | $0,035 \pm 0,009$ | $\leq 0,06$ |
| ^{238}Pu | $(1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ | $\leq 3 \cdot 10^{-3}$ | $\leq 2,5 \cdot 10^{-3}$ | $(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ | $(1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ | $\leq 3 \cdot 10^{-3}$ |
| $^{239+240}\text{Pu}$ | $(9,1 \pm 1,0) \cdot 10^{-3}$ | $(7,4 \pm 1,4) \cdot 10^{-3}$ | $(9,5 \pm 1,2) \cdot 10^{-3}$ | $(6,4 \pm 1,3) \cdot 10^{-3}$ | $(7,9 \pm 1,1) \cdot 10^{-3}$ | $(6,2 \pm 1,1) \cdot 10^{-3}$ |
| ^{60}Co | $\leq 0,06$ | $\leq 0,16$ | $\leq 0,06$ | $\leq 0,06$ | $\leq 0,16$ | $\leq 0,06$ |

III.6.2 - EXERCICE D'INTERCOMPARAISON AIEA-ALIMENTS

En 1994, à la demande de la Dircen, un exercice d'intercomparaison a porté sur des échantillons de cinq espèces comestibles et représentatives des milieux terrestres et marins, eau de coco, mérou céleste, bénitier, turbo et langouste, prélevés en octobre 1994, sur l'atoll de Mururoa.

Huit laboratoires de renommée internationale ont participé à l'exercice supervisé par le laboratoire de l'environnement marin de l'AIEA, à Monaco :

- Marine environment laboratory (AIEA), Monaco ;
- Lawrence Livermore national laboratory, Université de Californie, Livermore, États-Unis ;
- Radiation physics department, Université de Lund, Suède ;

- Federal fisheries center, Hambourg, Allemagne ;
- Australian radiation laboratory, Victoria, Australie ;
- National radiation laboratory, Christchurch, Nouvelle-Zélande ;
- Fisheries laboratory, Lowestoft, Grande-Bretagne ;
- Service mixte de surveillance radiologique et biologique de l'Homme et de l'environnement, du CEA et de la Dircen.

L'AIEA a été chargée d'organiser, sur le terrain, l'exercice d'intercomparaison. Ses experts ont défini les lieux et modes de prélèvement des échantillons. Toutes les phases de prélèvement des échantillons et celles de traitement associées (dissection, étuvage, calcination, broyage, homogénéisation et conditionnement) ont été effectuées sous le contrôle d'un responsable de l'AIEA, assisté de deux représentants des laboratoires étrangers. Les lieux de prélèvements étaient uniformément répartis sur l'ensemble de l'atoll de Mururoa, dont le lagon était découpé en quatre secteurs : Est, Nord, Ouest et Sud (Fig. 62).

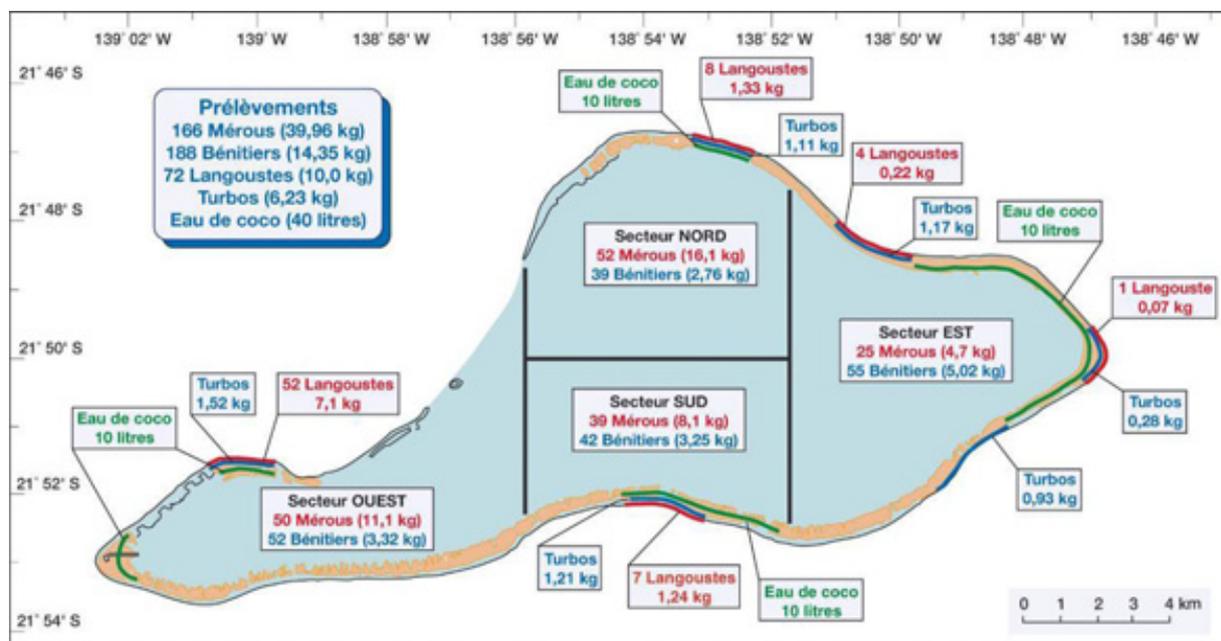


FIG. 62. – Lieux de prélèvements, natures et masses des échantillons prélevés à Mururoa, dans le cadre de l'intercomparaison avec l'AIEA, en 1994.

Les résultats obtenus par les laboratoires étaient le reflet de la radioactivité d'origine artificielle présente en 1994 dans les échantillons biologiques de l'atoll de Mururoa (Tableau 14).

Cette intercomparaison a mis en évidence la faible dispersion des résultats de mesure obtenus par les laboratoires participants, quels que soient les radionucléides d'origine artificielle quantifiés, à des niveaux d'activité très faibles, souvent proches de la limite de détection. Cet exercice a confirmé la maîtrise par le laboratoire de mesure du SMSRB des protocoles de mesure de très faibles niveaux d'activité au sein d'échantillons environnementaux et a mis en évidence les ordres de grandeur des incertitudes attachées à la mesure de la radioactivité des échantillons biologiques contenant des traces de radionucléides.

Tableau 14. Résultats de mesures ($Bq.kg^{-1}$) de l'exercice d'intercomparaison de l'AIEA. Les valeurs des résultats en ^{40}K , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$ obtenues par le laboratoire du SMSRB sont comparées à celles retenues par l'AIEA. Un échantillon de référence, hors sites, a été prélevé sur l'atoll de Rangiroa.

| Échantillon | ^{40}K | | ^{60}Co | |
|---------------------|---|----------------|---|----------------|
| | Valeur médiane et amplitude retenues par l'AIEA | Résultat SMSRB | Valeur médiane et amplitude retenues par l'AIEA | Résultat SMSRB |
| Mérou Rangiroa | 115 (108 - 153) | 110 ± 8 | < 0,03 | < 0,017 |
| Mérou secteur Nord | 116 (105 - 149) | 115 ± 8 | 0,04 (0,02 - 0,05) | 0,038 ± 0,014 |
| Mérou secteur Sud | 117 (86 - 154) | 117 ± 8 | 0,02 (0,01 - 0,05) | < 0,027 |
| Mérou secteur Est | 116 (104 - 153) | 116 ± 8 | 0,03 (0,01 - 0,05) | 0,031 ± 0,014 |
| Mérou secteur Ouest | 112 (109 - 136) | 112 ± 8 | 0,05 (0,04 - 0,07) | 0,037 ± 0,014 |
| Bénitier | 68 (64,8 - 90) | 69,0 ± 4,9 | 3,1 (2,6 - 3,9) | 2,99 ± 0,15 |
| Turbo | 82 (76,9 - 104) | 82,0 ± 5,8 | 0,03 (0,02 - 0,04) | 0,028 ± 0,008 |
| Langouste | 127,5 (114 - 162) | 114 ± 8 | 0,03 (0,01 - 0,04) | 0,027 ± 0,010 |
| Eau de coco | 57 (51,7 - 68,3) | 57,9 ± 4,1 | < 0,03 | < 0,0071 |

| Échantillon | ^{90}Sr | | ^{137}Cs | |
|---------------------|---|----------------|---|----------------|
| | Valeur médiane et amplitude retenues par l'AIEA | Résultat SMSRB | Valeur médiane et amplitude retenues par l'AIEA | Résultat SMSRB |
| Mérou Rangiroa | <0,03 | <0,032 | 0,23 (0,20 - 0,29) | 0,23 ± 0,02 |
| Mérou secteur Nord | <0,01 | <0,014 | 0,30 (0,29 - 0,33) | 0,29 ± 0,03 |
| Mérou secteur Sud | <0,01 | <0,021 | 0,30 (0,27 - 0,32) | 0,28 ± 0,03 |
| Mérou secteur Est | <0,02 | <0,035 | 0,26 (0,23 - 0,32) | 0,23 ± 0,03 |
| Mérou secteur Ouest | <0,02 | <0,020 | 0,35 (0,31 - 0,38) | 0,32 ± 0,03 |
| Bénitier | 0,02 (0,01 - 0,03) | <0,024 | 0,028 (0,01 - 0,05) | 0,027 ± 0,009 |
| Turbo | <0,02 | <0,029 | 0,041 (0,01 - 0,07) | 0,021 ± 0,007 |
| Langouste | <0,02 | <0,022 | 0,10 (0,086 - 0,13) | 0,086 ± 0,010 |
| Eau de coco | 0,006 (0,003 - 0,009) | 0,006 ± 0,001 | 0,17 (0,16 - 0,28) | 0,17 ± 0,02 |

| Échantillon | ^{238}Pu | | $^{239+240}Pu$ | |
|---------------------|---|-------------------|---|---------------------|
| | Valeur médiane et amplitude retenues par l'AIEA | Résultat SMSRB | Valeur médiane et amplitude retenues par l'AIEA | Résultat SMSRB |
| Mérou Rangiroa | < 0,00014 | < 0,00018 | 0,00013 (0,00007 - 0,00019) | < 0,00018 |
| Mérou secteur Nord | 0,000037 (0,000022 - 0,000052) | < 0,000063 | 0,00028 (0,00015 - 0,00041) | 0,000268 ± 0,000054 |
| Mérou secteur Sud | < 0,00016 | < 0,00012 | 0,00017 (0,00002 - 0,00035) | 0,00017 ± 0,00006 |
| Mérou secteur Est | < 0,0002 | < 0,00017 | 0,00013 (0,00001 - 0,00036) | < 0,00017 |
| Mérou secteur Ouest | 0,00016 (0,00011 - 0,00021) | 0,00016 ± 0,00006 | 0,00042 (0,00008 - 0,00076) | 0,00038 ± 0,00007 |
| Bénitier | 0,147 (0,131 - 0,157) | 0,149 ± 0,009 | 0,62 (0,54 - 0,71) | 0,622 ± 0,037 |
| Turbo | 0,0145 (0,0119 - 0,0171) | 0,0167 ± 0,0021 | 0,110 (0,092 - 0,128) | 0,113 ± 0,011 |
| Langouste | 0,00030 (0,00015 - 0,00045) | 0,00051 ± 0,00015 | 0,0020 (0,0015 - 0,0025) | 0,0024 ± 0,0004 |
| Eau de coco | <0,00004 | < 0,000055 | 0,000046 (0,000033 - 0,000059) | 0,000052 ± 0,000024 |

III.7 – CONCLUSION

Dès le milieu des années 1960, un dispositif complet de surveillance radiologique de l'ensemble des atolls de la Polynésie française était en place. Il s'appuyait sur trois entités de surveillance et de contrôle distinctes : l'une implantée à Papeete (Lése) et deux présentes sur les sites d'expérimentations (SMSR et SMCB). Les médecins et biologistes en charge de ces laboratoires étaient responsables de l'interprétation des résultats obtenus dans le cadre de la surveillance systématique des retombées des essais menés dans le Pacifique.

La qualité et la cohérence de la surveillance radiologique résident dans la sélection judicieuse des indicateurs environnementaux des niveaux d'activité des radionucléides de l'environnement. Elles reposent également sur la rigueur des opérations d'échantillonnage, de préparation et de conditionnement des échantillons prélevés. Les analyses radiologiques ont permis de connaître, à tout moment, les niveaux représentatifs de la radioactivité d'origine artificielle dans les différentes composantes de l'environnement, et d'estimer l'impact dosimétrique pour le personnel travaillant sur les sites et pour les populations vivant en Polynésie. Ainsi, la surveillance radiologique des biotopes polynésiens concerne l'atmosphère, l'hydrosphère et la géosphère. L'atmosphère est caractérisée par des prélèvements d'aérosols et d'eaux de pluie ; le domaine terrestre par des prélèvements d'échantillons de sols et d'eaux de source et de rivière ; le domaine marin par des échantillons d'eaux de mer, des lagons et de l'océan, de matières en suspension (MES) et de sédiments. La surveillance radiologique est complétée par des mesures de l'activité des radionucléides caractéristiques des essais au sein des différents indicateurs biologiques, espèces végétales et animales, représentatifs des biocénoses polynésiennes.

La surveillance radiologique mise en place pour suivre l'impact environnemental et sanitaire des essais nucléaires français peut être décrite suivant deux périodes. La première, celle des essais atmosphériques, va de 1966 à 1974. L'objectif était alors principalement d'assurer la radioprotection des travailleurs et de la population en faisant en sorte qu'ils ne soient pas soumis à des retombées conduisant à des expositions supérieures aux limites réglementaires. La deuxième, de 1975 à 1996, période des essais souterrains, était caractérisée par des apports de radioactivité très faibles et limités aux lagons. Outre les objectifs de radioprotection, il s'agissait alors de surveiller le confinement des essais souterrains dans le massif géologique.

Le système de surveillance de l'environnement et des aliments, mis en place dès le début des essais atmosphériques et toujours en vigueur 10 ans après l'arrêt des essais, est un système à emboîtement à trois niveaux à partir du terme source potentiel : les atolls d'expérimentations, le territoire polynésien au-delà de la limite des eaux territoriales des sites d'expérimentations et l'ensemble de l'hémisphère Sud. Cependant, la fréquence de l'échantillonnage, les types d'équipements de prélèvement et les protocoles de mesure ont évolué au cours du temps, pour tenir compte de l'évolution à la baisse des niveaux d'activité à la suite du passage des essais atmosphériques aux essais souterrains.

Les laboratoires chargés des mesures de radionucléides dans les matrices environnementales polynésiennes ont participé régulièrement à des exercices d'intercomparaisons interlaboratoires nationaux et internationaux. Les résultats obtenus lors de ces exercices ont permis de vérifier la qualité des mesures obtenues par les laboratoires chargés de la surveillance des sites, en particulier pour la mesure des traces de radioactivité. Les résultats des intercomparaisons ont confirmé leur maîtrise de la mesure d'échantillons environnementaux caractéristiques de la Polynésie. La qualité des résultats de mesure permet donc d'assurer la robustesse des évaluations des impacts radiologiques nécessaire à la radioprotection opérationnelle du personnel sur les sites et des populations en Polynésie.

Au total, de 1966 à 1996, la surveillance des espèces végétales et animales, à elle seule, a conduit au prélèvement sur l'ensemble du territoire polynésien d'environ 30 000 échantillons biologiques dont la plus grande partie a fait l'objet de plusieurs types de mesures conduisant à plusieurs centaines de milliers de résultats (Fig. 63).

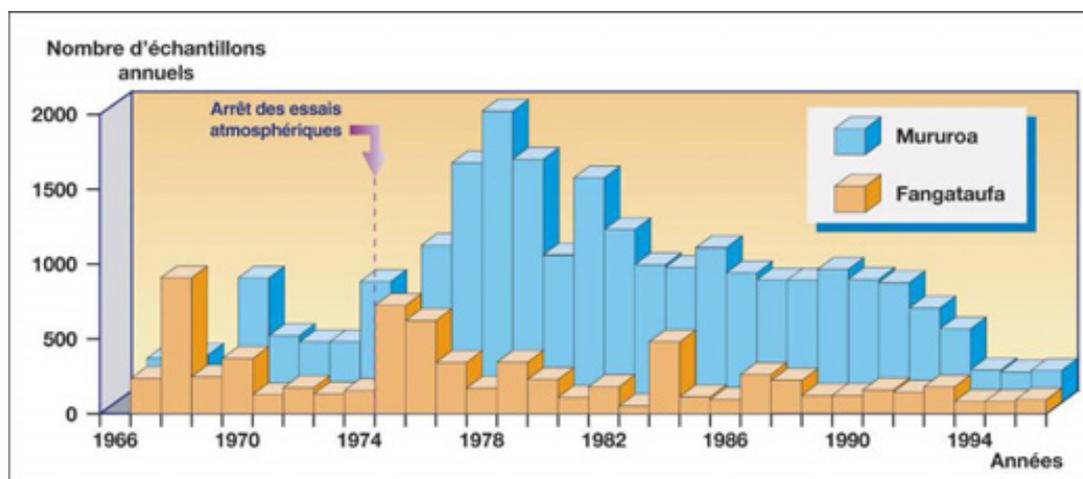


FIG. 63. – Évolution au cours du temps du nombre d'échantillons biologiques réalisés annuellement sur les sites d'expérimentations de Mururoa et Fangataufa.

Depuis la création du CEP, ce sont donc plusieurs millions de mesures qui ont donc d'ores et déjà été réalisées pour assurer les contrôles et la surveillance radiologiques des expérimentateurs, de la population résidant sur les îles et atolls ainsi que de l'environnement polynésien. Une synthèse de l'ensemble des résultats de mesure de la radioactivité, tant du milieu physique que biologique, et de l'évaluation des conséquences radiologiques pour la population vivant en Polynésie est transmise annuellement à l'UNSCEAR depuis 1966.

III.8 - BIBLIOGRAPHIE

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1999). - Report on the Intercomparison Run: Radionuclides in seawater and plankton collected outside Mururoa Atoll. Rep. N° IAEA/AL/44 - IAEA/ILMEL/48 AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1999). - Report on the Intercomparison Run: Radionuclides in biological samples collected at Mururoa Atoll. Rep. N° IAEA/AL/85 - IAEA/MEL/60 AIEA, Vienne, Autriche.

BALLESTRA S., LOPEZ J.J., GASTAUD J., PARISI P., VAS D. & NOSHKIN V., (1991) - Report on the intercomparison run IAEA-368: Radionuclides in Pacific Ocean sediment. IAEA/AL/047 - IAEA-MEL-Report n°47.

BALLESTRA S., BAXTER M.S., GASTAUD J., PETTERSSON H., POVINEC P.P. and VAS D., (1995) - Intercomparison report on radionuclide measurements on biological samples collected at Mururoa atoll. IAEA/AL/085 - IAEA-MEL-Report n°60.

BOURLAT Y., MILLIES-LACROIX J-C. et ABT D., (1994) - Measurement of low-level radioactivity in the Modane underground laboratory ICRM International Symposium on radionuclide metrology and its applications, Teddington (UK), June 7-11, 1993, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A339 p. 309-317.

- BOURLAT Y., MILLIES-LACROIX J-C. et LATOUR A., (1994) - Measurements of very low-level radioactivity with HP Ge detectors installed in the Modane Underground Laboratory; Proceedings of the South Pacific Environmental Radioactivity Association, 3rd Spera Workshop, Canberra (Australia), pages 80-85.
- BOURLAT Y., MILLIES-LACROIX J-C. and MARTIN G., (1995) - Results of measurements made by SMSRB on samples collected in Mururoa by international scientific delegations. ICRM Conference on Low Level Measurement Techniques, Seville (Spain), October 2-6, 1995 in Applied Radiation and Isotopes.
- CHIAPPINI R., TAILLADE J.M., (1995) - Les mesures de traces de radionucléides à vie longue dans l'environnement par ICP-MS. Actes du Congrès "Métrologie 95".
- CHIAPPINI R., TAILLADE J.M. et BREBION S. (1995) - Development of a high-sensitivity Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer for actinide measurement in the femtogram range. Rapport SMSRB.
- DSCEN (2003). - «Guide de surveillance radiologique des atolls de Mururoa et de Fangataufa». Rapport DSCEN
- DSCEN (2003). - «Guide de surveillance géomécanique des atolls de Mururoa et de Fangataufa». Rapport DSCEN.
- GARCIA-LEON M., MADURGA G., Editors, (1987) - Low-level Measurements and their applications to environmental radioactivity Proceedings of the first International Summer School, La Rabida, Huelva, Spain - World Scientific.
- MARTIN G., BOURLAT Y., GERARD R., TREGUIER J.Y. et BABLET J.P., (1991) - Results interpretation of radioactivity intercomparison in seawater and plankton collected outside Mururoa Atoll. Report n°11/SMSR/91.
- MARTIN J.M., THOMAS A.J., CHARRIER B., COUSTEAU J.Y. & SARANO F. (1990). - Assessment of artificial radionuclides issued from french nuclear bomb testing at Mururoa (french Polynesia). - Environmental Technology Letters, 11, n° 3, pp. 197-204.
- MILLIES-LACROIX J-C., BOURLAT Y. et ABT D., (1994) - Mesures de très faibles radioactivités dans des échantillons de l'environnement au moyen des détecteurs Ge HP installés dans le laboratoire souterrain de Modane - Journée de spectrométrie gamma et X93, 12-14 octobre 1993. Note CEA – N – 2756, p. 323-328.
- MILLIES-LACROIX J-C., BOURLAT Y. et LATOUR A., (1994). - Mesures de très faibles radioactivités par spectrométrie gamma dans le laboratoire souterrain de Modane - Journée de spectrométrie gamma et X93, 12-14 octobre 1993. Note CEA – N – 2756 p. 341-346.
- NAKANISHI T. and al., (1984) - Determination of $^{239+240}\text{Pu}$ in Seawater. N.I.M. 223, 239-242.
- ROBE M.C., RANNOU A. et LE BRONEC J. (1992). - Le radon dans l'environnement : Aspects physiques et sanitaires. Une revue des données en France. IPSN/DPEI/SERAC, 91191 GIF-SUR-YVETTE - Rapport DPEI/92-04.
- SAKANOUE M. (1987) - Low energy photon spectrometry for Pb-210 in the environment. Low-level measurements and their applications to environmental radioactivity, p. 374-381; Proceedings of the first International Summer School, La Rabida, Huelva, Spain. Garcia-Leon M., Madurga G., Editors. World Scientific.
- VINTERSVED I. (1994) - Intercomparison of large air samplers. Nordic Radioecology. The transfer of radionuclides through Nordic ecosystems to man. Chapter 1.2. Edited by Dahlgard H. Elsevier Science.

I.2. Le livre *La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie* **Chapitre VI: Protection des travailleurs et des populations**

La protection des travailleurs du CEP ainsi que la protection des populations ont fait l'objet d'attentions et d'améliorations constantes, tout au long de la période des essais nucléaires. Les consignes de radioprotection définies par la Commission consultative de sécurité (CCS) avaient pour objet de faire respecter la réglementation applicable à l'époque des essais.

Avant chaque essai, en particulier pendant la période initiale des essais atmosphériques, des moyens importants étaient mis en œuvre pour prévoir :

- la situation météorologique, au moment de l'explosion et durant les heures et les jours suivant l'essai ;
- la localisation et l'intensité des retombées radioactives, afin de s'assurer qu'elles ne puissent ni exposer les travailleurs des sites d'expérimentations et les populations au-delà des limites réglementaires, ni provoquer de retombées directes sur les îles habitées.

Les bilans des doses reçues tant par le personnel que par les populations sont présentés dans ce chapitre, en particulier le bilan des doses délivrées aux populations par six essais dont les retombées proches ont touché des îles habitées. En effet, malgré toutes les conditions et contraintes imposées pour la réalisation d'un essai qui entraînaient fréquemment son report, des évolutions imprévues de la situation météorologique ont entraîné des retombées vers des zones habitées.

VI.1 – DÉFINITION DES UNITÉS DE DOSES

La dose absorbée est une grandeur physique directe qui exprime la quantité d'énergie cédée à la matière par un rayonnement donné. L'unité employée est le gray (Gy). Elle est notée $D_{T,R}$ et exprime la dose délivrée à un tissu T par un rayonnement R.

Les différents types de rayonnements n'ont pas, à dose absorbée égale, le même effet sur la matière vivante : tissu ou organe. Pour en tenir compte, un facteur de pondération (W_R) est associé à chaque type de rayonnements pour établir la dose équivalente pour un organe ou un tissu donné. Le facteur W_R est égal à 1 pour les rayonnements gamma et X et, à 20 pour le rayonnement alpha. La dose équivalente est notée H_T et sa valeur est donnée par $H_T = D_{T,R} \cdot W_R$. L'unité employée est le sievert (Sv). Les différents types de tissus et organes ne présentant pas le même niveau de radiosensibilité, un facteur de pondération tissulaire (W_T) est introduit. Sa valeur est de 0,2 pour les gonades, de 0,12 pour la moelle osseuse et de 0,05 pour la thyroïde. Son utilisation permet de définir la dose efficace qui prend en compte l'ensemble des tissus et organes de l'organisme. Celle-ci est notée E et sa valeur est donnée par la formule : $E = \sum H_T \cdot W_T$. L'unité employée est également le sievert. La dose efficace, destinée à exprimer un niveau de risque en termes généraux, est le plus souvent employée et couramment exprimée sous le terme de «dose».

Dans le cas particulier de l'incorporation de radionucléides dans l'organisme, l'exposition est conditionnée par la décroissance radioactive du radionucléide et par son temps de séjour dans l'organisme (période biologique cf. Annexe 1). Pour tenir compte de cet aspect temporel, un calcul «d'engagement» de la dose sur la durée de l'exposition est effectué. Cette période est très variable selon les radionucléides, de quelques heures à plusieurs dizaines d'années. Par exemple, l'iode-131 a une période radioactive de 8 jours et une période biologique de 80 jours alors que le plutonium-239 a une période radioactive de 24 000 ans et une période biologique

de 20 ans dans le foie et de 50 ans dans l'os. Par convention, le calcul de l'engagement de dose (dose engagée) est fait, sauf cas particulier, sur 50 ans pour les adultes et sur 70 ans pour les enfants. Le calcul de dose engagée peut s'exprimer en termes soit de dose équivalente si l'on considère un organe «cible», soit de dose efficace si l'on prend en considération l'ensemble de l'organisme. Les doses sont calculées généralement en fonction de six classes d'âges : cinq classes pour les enfants et une pour les adultes.

Dans le cas de la thyroïde, dans la mesure où la plus grande part de l'exposition de cet organe est liée aux iodes radioactifs qui ont pour elle une affinité sélective, il est usuel d'utiliser le terme de dose équivalente à l'organe. Par ailleurs, la plus grande radiosensibilité de cet organe chez les enfants nécessite de tenir compte de l'âge des personnes au moment de l'exposition.

VI.2 – RÉGLEMENTATION RELATIVE À LA RADIOPROTECTION

En juillet 1966, le décret n°66-450 du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de protection contre les rayonnements ionisants venait d'entrer en vigueur. Par la suite, il a été complété par le décret 67-228 du 15 mars 1967 portant règlement d'administration publique relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants. Ces décrets avaient été établis sur la base des directives européennes des 2 février 1959, 5 mars 1962 et 27 octobre 1966.

Ces décrets fixaient les équivalents de dose maximaux admissibles pour les **travailleurs directement affectés des travaux sous rayonnements** suivant la terminologie de l'époque, comme suit :

- une dose cumulée de 50 (N-18) mSv, à un âge donné N, exprimé en années, pour l'organisme entier, les organes hématopoïétiques et les gonades ;
- 80 mSv sur une période de trois mois et 300 mSv sur une année, pour la peau, les tissus osseux (sauf mains, avant-bras, pieds et chevilles) ;
- 40 mSv sur une période de trois mois et 150 mSv sur une année, pour les autres organes et tissus internes ;
- 600 mSv sur une année pour les mains, avant-bras, pieds et chevilles.

Pour le personnel, des expositions externes exceptionnelles et concertées étaient permises, délivrées en une ou plusieurs fois sur une même opération, avec une limite de dose à l'organisme entier de 120 mSv à ne pas dépasser.

Ces décrets indiquaient les équivalents de dose maximaux admissibles sur un an pour les **travailleurs non directement affectés des travaux sous rayonnements**, comme suit :

- 15 mSv pour l'organisme entier, les organes hématopoïétiques et les gonades ;
- 15 mSv, pour les autres organes et tissus internes ;
- 30 mSv pour la peau et les tissus osseux ;
- 60 mSv pour les mains, avant-bras, pieds et chevilles.

Ils fixaient les équivalents de dose maximaux admissibles sur une année pour les **personnes du public**, comme suit :

- 5 mSv pour l'organisme entier, les organes hématopoïétiques et les gonades ;
- 15 mSv pour les autres organes et tissus internes.

À la suite de la directive européenne du 15 juillet 1980, portant modification des directives fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, le décret 86-1103 du 2 octobre 1986 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants a porté modification des équivalents de dose maximaux admissibles sur 12 mois consécutifs :

- 50 mSv pour la dose en profondeur (organisme entier) ;
- 500 mSv pour la peau, les mains, les avant-bras et les chevilles ;
- 150 mSv pour le cristallin.

Ces doses maximales admissibles étaient applicables au personnel affecté à des travaux sous rayonnements ionisants.

Pour les personnes du public et les travailleurs non affectés à des travaux sous rayonnements ionisants, les doses «en profondeur», c'est-à-dire les doses délivrées à l'organisme entier étaient limitées à 5 mSv.

C'est à la suite de la transposition en droit français de la directive européenne 96/29 du 13 mai 1996, que les décrets 2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants et 2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants limitent les doses à l'organisme entier appelées «doses efficaces» à 20 mSv sur 12 mois consécutifs pour les travailleurs et à 1 mSv par an pour le public.

VI.2.1 – CONCENTRATIONS MAXIMALES ADMISSIBLES

Le décret 66-460 du 20 juin 1966 définissait, dans son article 15, les concentrations maximales admissibles dans l'air et dans l'eau de boisson, notées CMA_{air} et CMA_{eau} . La CMA_{air} était, pour un radionucléide donné, l'activité volumique pour laquelle une inhalation continue durant une année entraînait une dose égale à la limite annuelle admise soit pour l'organisme entier soit pour l'un des organes critiques. La CMA_{eau} était, pour un radionucléide donné, l'activité volumique pour laquelle une ingestion de 1,1 litre d'eau par jour durant une année entraînait une dose égale à la limite annuelle admise soit pour l'organisme entier soit pour l'un des organes critiques.

La CMA pour les travailleurs d'un mélange inconnu de radionucléides était fixée par précaution à $7,4 \text{ mBq.m}^{-3}$ pour l'air et $3\,700 \text{ Bq.m}^{-3}$ pour l'eau. Lorsque la composition du mélange était connue, il était possible de calculer une CMA spécifique du mélange en faisant la somme des CMA de chaque radionucléide pondérée par leur activité volumique respective. Il est à noter que pour les personnes du public, il est explicitement indiqué que les CMA sont égales au dixième de celles appliquées pour les travailleurs.

La CMA représentait essentiellement une «valeur dérivée opérationnelle» en repère des résultats de mesure. Le dépassement d'une CMA était autorisé par la réglementation qui précisait que «l'inhalation ou l'ingestion en une fois de la quantité de radioéléments qui serait inhalée ou ingérée lors d'une exposition continue durant 3 mois consécutifs est permise, mais doit être évitée dans la mesure du possible».

VI.2.2 – CAS PARTICULIER DE LA THYROÏDE

De 1966 à 1974, période des essais atmosphériques, les limites de doses précisées dans le décret 66-450 ont été appliquées. Ce décret, conforté par la directive européenne du 27 octobre 1966, fixait les normes de base en radioprotection en limitant à 15 mSv la dose annuelle à la thyroïde pour le public et à 150 mSv pour les travailleurs.

Par la suite, la directive européenne en date du 15 juillet 1980, portant modification des directives fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants a établi une limite annuelle de dose à la thyroïde de 50 mSv, applicable tant en situation normale qu'en situation accidentelle. Ces principes n'ont pas été repris dans la réglementation française. La notion de limite annuelle de dose à la thyroïde a ensuite disparu de la réglementation tant française qu'européenne au profit de la limitation annuelle de la dose efficace.

C'est en 1984 que la CIPR a défini des niveaux d'intervention associés à des situations accidentelles ou exceptionnelles concernant les doses à la thyroïde. Des niveaux dérivés ont ensuite été établis dans des documents publiés par l'AIEA et l'OMS. Il s'agit cependant de valeurs de référence, appelées niveaux d'intervention, qui permettent d'aider les autorités dans la prise de décision des mesures à prendre pour protéger les populations en cas d'exposition ou de risque d'exposition. Il est important de souligner que les niveaux d'intervention sont des valeurs guides destinées aux gestionnaires d'une situation de crise dans la mise en œuvre de mesures palliatives et non de limites annuelles de dose. Ces niveaux d'intervention variaient de 50 mGy à 5 Gy, selon les contre-mesures appliquées et les risques entraînés par la mise en place de ces mesures palliatives (CIPR 40).

VI.3 – ORGANISATION DE LA RADIOPROTECTION

Afin de mener à bien les essais, les responsabilités respectives du ministère de la Défense et celles du CEA étaient clairement définies :

- Le ministère de la Défense avait la responsabilité globale des opérations et, notamment, du respect des règles de sécurité sur les sites d'expérimentations.
- Le CEA était responsable de l'ensemble des programmes scientifiques, c'est-à-dire de la conception de l'engin à expérimenter, de la réalisation technique de l'essai, des mesures associées et de leur exploitation.

Pour réaliser les essais nucléaires, le ministère de la Défense avait mis en place un organisme chargé de la conduite des essais : le Groupement opérationnel des expérimentations nucléaires (Goen). Il s'agissait d'une structure temporaire, limitée à la durée des campagnes. Pour le Centre d'expérimentation du Pacifique, il revenait au général commandant le Goen de décider de l'heure à laquelle devait avoir lieu l'explosion de l'engin et de décider de sa réalisation, en fonction des conditions locales. Il lui appartenait également de donner l'ordre d'évacuation des sites avant chaque essai atmosphérique, d'assurer la gestion des mouvements d'avions et de navires autour des atolls, de superviser les contrôles radiologiques après l'essai et d'autoriser ensuite le retour des équipes sur les atolls (cf. Annexe 4).

Depuis 1958, les activités du CEA liées à la défense nationale relèvent de la Direction des applications militaires (DAM). En son sein, la Direction des essais (DE) prenait en charge les installations spécifiques aux expérimentations nucléaires (ouvrages pour les appareillages de mesures, nacelles de support d'engins, ballons...), ainsi que toutes les dispositions relatives en matière radioprotection à proximité de la zone d'essai appelée aussi point zéro, et lors de la mise en œuvre de l'engin. C'est également à la Direction des essais que revenaient la

définition, l'acquisition et le dépouillement des résultats des mesures neutroniques, radiologiques, radiochimiques, optiques et sismiques.

Le 30 janvier 1964, la Direction des centres d'expérimentations nucléaires (Dircen) a été créée afin de coordonner les actions du ministère de la Défense et du CEA. C'était un organisme mixte Armées-CEA, dirigé par un officier général relevant directement du ministre de la Défense. Elle était chargée de la conception, de l'organisation, de la construction et du fonctionnement du CEP, ainsi que de la préparation et de l'exécution des essais. Deux services chargés de la sécurité regroupant des spécialistes du CEA et de la Défense lui étaient rattachés :

- Le SMSR, Service mixte de sécurité radiologique, était chargé de la dosimétrie externe du personnel, du suivi de la dosimétrie d'ambiance, des investigations de terrain, des mesures fournies par les postes de mesures radiologiques (PCR) et de la dosimétrie de zone. Ce service avait également pour mission la mise en oeuvre des moyens, la définition et l'application des dispositions à prendre pour respecter la réglementation en matière de radioprotection pour l'ensemble du personnel de la Défense, du CEA et des entreprises sous-traitantes.
- Le SMCB, Service mixte de contrôle biologique, avait pour mission le contrôle radiologique des différentes composantes de la biosphère : milieux terrestre et marin et des différents produits entrant dans la ration alimentaire des populations des cinq archipels.

Le SMSR et le SMCB ont fusionné en 1994, pour former le Service mixte de sécurité radiologique et biologique de l'homme et de l'environnement (SMSRB).

VI.4 – ORGANISATION DE LA MÉDECINE DU TRAVAIL SUR SITE

La diversité des métiers exercés sur les sites d'expérimentations couvrait un large éventail de compétences et, compte tenu des contraintes spécifiques à chaque organisme de tutelle, la médecine du travail y était du ressort d'un service médical propre au CEA pour le personnel CEA et d'un service médical militaire pour le personnel du ministère de la Défense. La réglementation et la législation du travail concernant la radioprotection étaient strictement appliquées par les deux organismes. À poste de travail équivalent, la surveillance médicale était la même pour tout le personnel, qu'il dépende du ministère de la Défense, du CEA, des entreprises sous-traitantes locales ou métropolitaines.

VI.4.1 – PERSONNEL DU CEA

Le CEA disposait au CEP, comme dans tous ses centres, d'une structure dédiée à la médecine du travail très orientée, par vocation, vers la surveillance radiologique. Les Services de médecine du travail (SMT) étaient dirigés par des médecins, spécialistes chargés, à partir des fiches de poste et de nuisance renseignées par l'employeur, de vérifier l'aptitude du personnel au poste de travail et, en particulier, celle à pouvoir travailler sous rayonnements ionisants. Les médecins assuraient la surveillance de l'exposition et, surtout, recherchaient une éventuelle exposition interne qui, si elle était avérée, était évaluée et traitée. Le SMT disposait de l'appui technique des Laboratoires d'analyses médicales (Lam), dirigés par des pharmaciens biologistes. Ces laboratoires étaient chargés des analyses sanguines, des analyses radiochimiques et des anthropogammamétries, dont le but est de déterminer le spectre des radionucléides présents dans un organisme humain pour détecter et quantifier une éventuelle exposition interne. Une coopération étroite existait avec le Lam du centre métropolitain CEA/DAM de Bruyères-le-Châtel, qui effectuait toutes les analyses du personnel, avant le départ vers les sites d'expérimentations et avec le Service de santé des Armées (SSA) qui

effectuait les analyses sur sites. Un renfort de personnel du Lam a été mis en place à Mahina (Tahiti) pour la durée de chaque campagne d'essais atmosphériques et à Mururoa pendant les essais souterrains.

VI.4.2 – PERSONNEL DU MINISTÈRE DE LA DÉFENSE

Ce sont des médecins du Service de santé des armées (SSA) qui assuraient la charge de la médecine du travail. Ils s'appuyaient sur un laboratoire d'analyses médicales (Lam) ainsi que sur un laboratoire de radiobiologie (LRB) qui effectuait les analyses radiochimiques, ainsi que les anthropogammamétries. Durant la période des essais atmosphériques, outre le LRB implanté auprès de l'hôpital Jean Prince à Papeete, des structures mobiles étaient positionnées à la demande, soit à bord de bâtiments de la Marine Nationale, soit sur des atolls. Durant la période des essais souterrains, ces installations ont été implantées à terre, à l'Infirmierie-hôpital des sites (IHS) de Mururoa. Le Service de santé des Armées mettait en oeuvre les Postes de décontamination fine (PDF), où étaient effectués des soins spécifiques (décontamination de la peau ou des blessures), en cas d'incident ou d'accident à caractère radiologique. Pendant les essais atmosphériques, les PDF étaient installés sur les bâtiments de la Marine Nationale et à Hao, puis à Mururoa pendant les essais souterrains.

VI.4.3 – PERSONNEL DES ENTREPRISES SOUS-TRAITANTES

Concernant les entreprises métropolitaines intervenant pour le compte du CEA, un service spécialisé, dépendant de l'Association des centres médico-sociaux (ACMS), avait été créé pour couvrir le cadre spécifique des essais nucléaires : le Service de protection des entreprises (SPE). Dès le début des essais, par accord entre le SPE et le SMT de la Direction des essais, ce dernier disposait d'installations et d'une permanence médicale, à Tahiti, puis à Mururoa, pour assurer le suivi du personnel en mission. Après 1989, la réglementation ayant évolué, le suivi du personnel des entreprises devait être assuré par leurs propres médecins du travail. Le suivi du Personnel de recrutement local (PRL), dépendant directement de la Défense, du CEA, ou des entreprises soustraitantes travaillant pour ces deux organismes, suivait les mêmes règles que celles appliquées au personnel métropolitain. En fonction de son appartenance, le personnel était suivi soit par le Centre interarmées de médecine et de prévention (CIMP), soit par le SMT de la Direction des essais du CEA.

VI.4.4 – ACCIDENTS DU TRAVAIL

La protection des travailleurs et de la population est le principal objet de ce chapitre. Cependant, si aucun accident n'a entraîné d'exposition aux rayonnements ionisants ayant eu des effets déterministes, c'est-à-dire létaux ou durablement handicapants, les activités du CEP ont été accompagnées, comme dans toutes les entreprises industrielles et grands chantiers, par des accidents du travail. Certains d'entre eux ont entraîné le décès de personne du CEA, des Armées et des sociétés sous-traitantes :

- septembre 1965 : sur la base de Hao dans le cadre d'un chantier de travaux publics, une explosion a provoqué la mort de 3 employés de la société Dumez-Citra ;
- janvier 1970 : sur la base de Hao, l'explosion d'une citerne de carburant a entraîné le décès de 7 personnes dont 2 personnels militaires ;
- juin 1972 : le crash d'un Boeing KC135 au décollage de la base de Hao pour une mission d'observation à la suite de l'essai Titania a entraîné le décès de 6 personnes de la Défense ;

- juillet 1979 : au cours d'une opération d'assainissement de la cuve d'expérimentation Meknès sur l'atoll de Mururoa, une explosion a provoqué le décès de deux personnes du CEA ;
- en 1980 et 1985 : sur l'atoll de Mururoa, deux personnes du CEA sont décédées à la suite d'accidents mettant en cause des véhicules de transport et de lavage.

VI.5 – SURVEILLANCE DU PERSONNEL

VI.5.1 – EXPOSITION EXTERNE

Le suivi dosimétrique des travailleurs du CEP susceptibles d'être exposés était effectué à partir de la mesure de la dose individuelle et du contrôle des niveaux d'irradiation des zones où évoluait le personnel. Durant la période des essais atmosphériques, des dosimètres photographiques étaient utilisés pour effectuer la dosimétrie individuelle réglementaire du personnel. Compte tenu des techniques de mesure, les seuils d'enregistrement des doses étaient fixés à 0,2 mSv, les doses inférieures à ce seuil étant considérées comme nulles. Pendant la dernière décennie des essais souterrains, le dosimètre photographique a été remplacé par des dosimètres thermo luminescents pour les personnels de catégorie B susceptibles d'être les moins exposés parmi les personnels surveillés.

D'autres moyens de mesure à caractère opérationnel, comme le stylo électromètre (stylo-dosimètre) et le débitmètre intégrateur, ont été utilisés pour permettre un accès plus rapide à la dose reçue. Ils avaient un rôle d'alerte et de redondance de la mesure. Au moment d'un essai atmosphérique et pour toutes les missions qui pouvaient entraîner un risque d'exposition, trois moyens dosimétriques pouvaient être simultanément mis en œuvre : le dosimètre photographique réglementaire, le dosimètre thermoluminescent et le stylo électromètre.

Un dosimètre photographique est constitué d'un film de type photographique dont la mesure du noircissement permet d'estimer la dose reçue. Une partie du film protégée par plusieurs écrans permet de différencier les expositions dues aux différents types de rayonnements (X, bêta et gamma).

Un dosimètre thermoluminescent permet de déterminer la dose à partir de la mesure des interactions du rayonnement avec un matériau ayant des propriétés thermoluminescentes, comme le fluorure de calcium (CaF_2), le sulfate de calcium (CaSO_4) dopé au dysprosium ou le fluorure de lithium (LiF). L'action d'un rayonnement sur un cristal thermoluminescent se fait essentiellement par des particules chargées existantes ou créées lors de l'interaction des atomes du cristal avec un rayonnement gamma, X ou neutron. L'énergie des particules chargées est transférée à des électrons qui sont libérés et piégés par les impuretés situées dans la bande de conduction du cristal. Une augmentation de la température du cristal provoque la libération des électrons et l'émission d'un photon lumineux, mais provoque la perte de la trace de l'interaction entre le rayonnement et le cristal. Cette émission de lumière est proportionnelle à l'intensité du rayonnement interagissant avec le cristal.

Les dosimètres électromètres, ou stylos-dosimètres, ont un fonctionnement particulièrement simple. Ils sont composés de deux électrodes chargées, se rapprochant lorsqu'elles se déchargent lors de l'ionisation de l'air due au rayonnement ambiant.

Les équipages des avions appelés Vautour assurant les missions de pénétration pilotée disposaient d'un équipement individuel de protection, avec masque et adduction d'air et d'oxygène ainsi que d'un film dosimètre et de stylos-dosimètres. Les avions étaient également équipés de débitmètres portatifs et de débitmètres-dosimètres de type DUK-DUR 304.

Par ailleurs, les mesures environnementales d'irradiation complétaient ce dispositif.



Avion Vautour équipé des systèmes de prélèvement d'échantillons d'aérosols.



Contrôle radiologique de l'équipage d'un avion Vautour après une mission de prélèvement d'échantillons d'aérosols dans le nuage radioactif.

VI.5.1.1 – ESSAIS ATMOSPHERIQUES

Entre 1966 et 1974, 52 750 personnes, quels que soient leur appartenance, leur fonction, leur risque d'exposition, leur durée de séjour et leur lieu d'affectation ont bénéficié d'une surveillance dosimétrique. L'analyse des résultats de la surveillance de ces travailleurs montre que seuls 3 425 d'entre eux ont été exposés lors d'opérations particulières, listées ci-après en fonction des missions respectives du personnel du CEA, du ministère de la Défense et des entreprises sous-traitantes.

Personnel du CEA

- la mise en oeuvre des engins expérimentaux, du montage de l'engin à sa mise en place sur son support (barge puis ballon) ;
- les opérations de reconnaissance radiologique des sites ;
- la récupération des enregistrements dans la zone de l'essai ;
- l'assainissement des zones d'essais ;
- la récupération des prélèvements réalisés par l'envoi de fusées ;
- le traitement à Hao des échantillons radioactifs prélevés dans le nuage.

Personnel du ministère de la Défense

- les missions de pénétration pilotée et de poursuite du nuage ;
- les missions d'écoute des réseaux de bouées radiologiques ;
- les investigations et prélèvements dans la zone des retombées proches ;
- le repérage et le chalutage des têtes de fusées tirées dans le nuage ;
- la réception des missions aéroportées ;
- la décontamination des matériels.

L'histogramme de la répartition des doses annuelles calendaires individuelles mesurées pendant la période des essais atmosphériques montre que la plus grande partie du personnel a reçu des doses inférieures au seuil d'enregistrement (0,2 mSv). Des doses annuelles supérieures à 5 mSv ont été enregistrées dans 291 cas. Le dépassement de la limite réglementaire annuelle de dose (50 mSv) est constaté dans 3 cas (Fig. 181).

Le personnel médical susceptible d'être exposé au rayonnement X à l'occasion d'actes de radiologie, faisait également l'objet d'un suivi dosimétrique externe, conformément à la réglementation. Cette statistique ne prend pas en compte les doses reçues par cette catégorie de personnel.

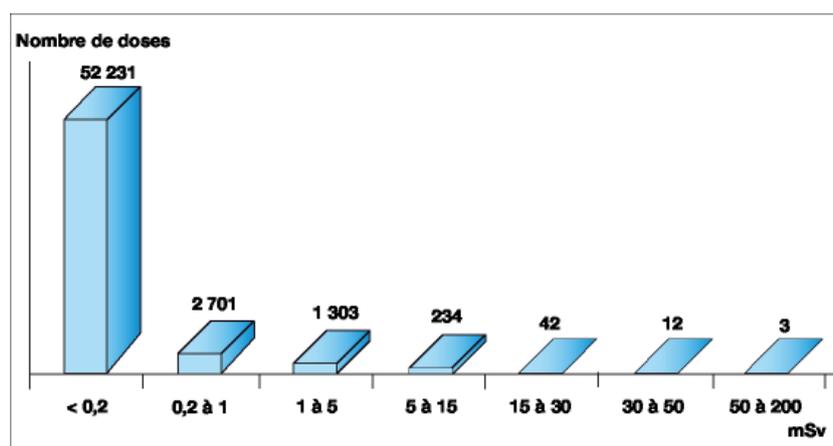


FIG. 181. Histogramme du nombre de doses annuelles individuelles par année calendaire pendant la période des essais atmosphériques, hors personnel médical et irradiations médicales (1966-1974).

Deux des trois cas observés dans la classe allant de 50 à 200 mSv, correspondent à des doses de 120 et 180 mSv reçues par l'équipage de l'avion effectuant la pénétration pilotée dans le nuage radioactif suite à l'essai Aldébaran, en 1966. Le troisième cas, correspondant à une dose de 60 mSv, concerne un membre du personnel basé à Tahiti. Les expositions les plus fortes ont été délivrées aux équipages des avions Vautour chargés des pénétrations pilotées destinées à effectuer des prélèvements d'aérosols atmosphériques au cours de vols au travers ou à proximité du nuage radioactif. Ces prélèvements étaient effectués, soit en pénétrant le nuage afin de recueillir le dépôt des aérosols sur des filtres montés sur l'avion, soit en tirant des fusées, de type Matra munies de filtres, à travers le nuage. Les doses individuelles supérieures à 30 mSv reçues par les équipages au cours de ces opérations sont rassemblées dans le tableau 54. Après 1971, toutes les doses reçues par les équipages des pénétrations pilotées ont été inférieures à 30 mSv. En 1972, les deux doses les plus élevées étaient égales à 29 et 23 mSv ; en 1973 elles étaient égales à 19 et 18,6 mSv et en 1974 égales à 19,8 et 19,2 mSv.

Tableau 54. Doses individuelles maximales supérieures à 30 mSv reçues par les équipages des avions au cours des opérations de pénétration pilotée.

| Année | Dose reçue en mSv | Année | Dose reçue en mSv |
|-------|-------------------|-------|-------------------|
| 1966 | 180 | 1971 | 34 |
| 1966 | 120 | 1971 | 33 |
| 1966 | 35 | 1971 | 32 |
| 1966 | 34 | 1971 | 31 |
| 1967 | 32,5 | 1971 | 31,5 |
| 1971 | 34 | | |

VI.5.1.2 – ESSAIS SOUTERRAINS

Entre 1975 et 1996, plus de 5 200 travailleurs ont fait l'objet d'une surveillance dosimétrique, fonction de leur affectation et de leur période de présence sur site. Les risques d'exposition externe étaient limités et seul le personnel effectuant les opérations spécifiques suivantes était susceptible d'être exposé :

- montage des engins nucléaires à tester ;
- exécution des post-forages après les essais ;
- traitement des échantillons de lave issus des cavités ;
- décontamination des instruments de forage.

L'histogramme de la répartition des doses annuelles individuelles pendant la période des essais souterrains (Fig. 182) montre que la plus grande partie du personnel a été exposée à une dose annuelle inférieure au seuil d'enregistrement (0,2 mSv). Il indique également que 2 124 doses annuelles étaient supérieures à 0,2 mSv, dont 10 doses comprises entre 5 et 15 mSv et une seule dose annuelle individuelle comprises entre 15 et 30 mSv.

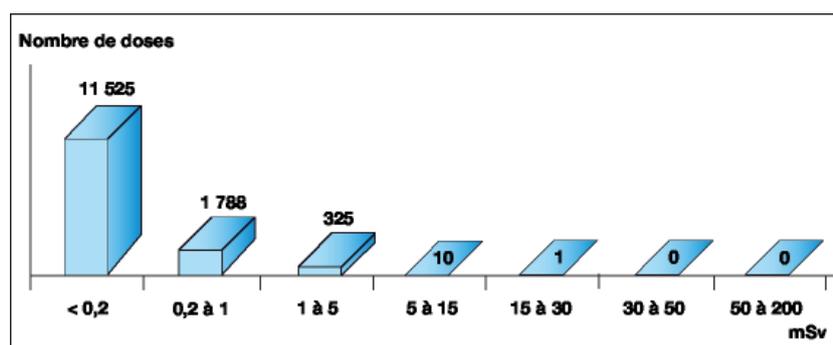


FIG. 182. Histogramme du nombre de doses annuelles individuelles par année calendaire, pendant la période des essais souterrains, hors personnel médical et hors irradiation médicale (1975-1996).

Cette statistique ne prend pas en compte les doses reçues par le personnel médical et celles reçues pour des raisons médicales par les travailleurs. Les doses reçues par le personnel

médical à l'occasion d'actes de radiologie étaient suivies conformément à la réglementation. Les doses dues à l'irradiation naturelle et aux actes de radiologie diagnostiques ou thérapeutiques ne sont pas prises en compte dans la limitation annuelle des doses, que ce soit pour les travailleurs ou pour le public.

VI.5.2 – EXPOSITION INTERNE

Pendant toute la période des essais nucléaires, la recherche d'une éventuelle exposition interne consécutive à l'inhalation ou à l'ingestion d'éléments radioactifs s'est appuyée sur les résultats des investigations suivantes :

- les mesures anthropogammamétriques qui permettent de déterminer le spectre et l'activité des radionucléides émetteurs gamma incorporés dans l'organisme ;
- les mesures de l'activité des radionucléides présents dans les urines, les fèces et les prélèvements nasaux.

Les résultats de ces mesures et les connaissances acquises sur le métabolisme des radionucléides dans l'organisme humain permettent de déterminer les activités incorporées et d'évaluer les doses.

Près de 250 000 examens anthropogammamétriques et radiotoxicologiques ont été réalisés à titre systématique ou dans le cadre de la surveillance médicale du personnel affecté à des travaux sous rayonnements ionisants.

VI.5.2.1 – EXAMENS ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUES

Le rayonnement gamma émis par le corps entier était détecté au moyen d'une ou plusieurs sondes en iodure de sodium (NaI) de grande sensibilité, placées dans une enceinte blindée qui protégeait du rayonnement ambiant.

Le résultat de la mesure était ramené au poids de la personne examinée (nombre de désintégrations par minute et par kilogramme) avec pour hypothèse une répartition homogène de la radioactivité dans le corps humain. Cette mesure globale des émetteurs gamma d'une durée d'une dizaine de minutes permettait d'évaluer la charge corporelle et donc d'estimer l'exposition interne, connaissant les produits de fission susceptibles d'être présents.

La mesure du rayonnement émis par la personne contrôlée était comparée avec celle d'une personne de même poids n'ayant jamais été exposée. Le rapport de ces 2 mesures était appelé indice de tri. Normalement comprise entre 0,5 et 2, une valeur supérieure de l'indice de tri entraînait une suspicion de contamination et imposait une analyse fine du spectre à la recherche de radionucléides artificiels émetteurs gamma dans les énergies comprises entre 200 et 2 000 keV. Dans le cas d'une détection de radionucléides non naturels, des analyses radiotoxicologiques des excréta (selles, urines par exemple) pouvaient être demandées permettant de confirmer ou d'infirmer une contamination interne par un mélange de produits de fission émetteurs gamma.

De 1966 à 1995, près de 150 000 examens anthropogammamétriques ont été effectués : environ 65 000 pendant la période des essais atmosphériques et 85 000 pendant la période des essais souterrains.



Installation d'anthropogammamétrie en place sur l'atoll de Mururoa montrant une sonde NaI dans une enceinte blindée.

Les évaluations réalisées à partir des résultats de ces examens complémentaires correspondaient généralement à une évaluation de l'exposition interne nulle. Lors des essais souterrains, le risque d'exposition interne était essentiellement dû à la présence des radioisotopes de l'iode dans les boues et sur les tiges des post-forages. L'examen anthropogammamétrique était alors localisé au niveau de la thyroïde, organe cible de l'accumulation d'iode.

VI.5.2.2 – ANALYSES RADIOTOXICOLOGIQUES

Durant les essais atmosphériques, les dosages des ^{239}Pu , ^{144}Ce et ^{90}Sr étaient effectués à partir d'analyses radiotoxologiques car les caractéristiques radioactives de ces radionucléides ne les rendent pas directement décelables par les examens anthropogammamétriques. Durant les essais souterrains, les analyses radiotoxologiques portaient principalement sur les radioisotopes du plutonium et sur le tritium, compte tenu des risques d'exposition interne essentiellement lors des opérations d'assainissement réalisées sur les zones d'essais de sécurité, de l'installation Meknès et durant les opérations de post-forage.

Par ailleurs, des examens radiotoxologiques des selles ont été réalisés sous la forme de sondages et à titre systématique y compris pour des personnes non exposées professionnellement afin de compléter la surveillance de l'environnement.

VI.5.2.3 – ACTIVITÉS AYANT ENTRAÎNÉ DES EXPOSITIONS INTERNES

Diverses opérations menées dans le cadre des essais ont entraîné l'exposition interne de travailleurs. Elles sont rappelées dans les paragraphes suivants.

Travaux en présence de plutonium

Deux expérimentations atmosphériques ont produit une énergie suffisamment basse (50 t équivalent TNT) pour que le risque dû aux dépôts de radionucléides émetteurs alpha soit significatif par rapport au risque dû aux radionucléides émetteurs bêta-gamma. Ce sont les essais Pégase et Melpomène effectués respectivement les 27 juillet 1970 et 28 juillet 1973. Dans le cas de l'essai Pégase, les examens anthropogammamétriques et radiotoxicologiques réalisés sur le personnel ayant exécuté des travaux d'assainissement d'une étroite bande corallienne touchée par une retombée de plutonium ont révélé des doses comprises entre 20 et 320 μSv , avec une moyenne de 170 μSv . Les doses dues à l'exposition externe de ces personnels ont été comprises entre 0,5 et 5 mSv, avec une moyenne de 2 mSv.

D'autres opérations d'assainissement ont été réalisées sur la zone où ont eu lieu les essais de sécurité, entre 1981 et 1988. La dose maximale reçue lors de ces opérations a été estimée à 3,9 mSv. Le détail des travaux d'assainissement est donné dans le chapitre VII.

Travaux en présence d'iode radioactif

Les résultats des anthropogammamétries ont permis d'estimer les doses à la thyroïde du personnel engagé dans les travaux d'assainissement suite à l'essai Pégase, entre 0,6 et 1,5 mSv.

Lors des essais souterrains, une fraction de l'iode présent dans l'eau de la cavité créée par l'essai pouvait remonter en surface lors des opérations de post-forage et se déposer sur les outils utilisés. Un risque d'exposition pour les équipes de forage et de radioprotection présentes sur la plate-forme des post-forages justifiait une surveillance spécifique.

Chantiers d'assainissement

Les chantiers d'assainissement ouverts après les essais de sécurité et les expériences réalisées dans l'installation Meknès ainsi que durant les opérations de post-forage ont provoqué l'exposition de personnel dont les doses reçues n'ont pas dépassé 30 mSv, comme le montre le récapitulatif statistique suivant :

| | |
|------------------|-------------|
| — 0,01 à 0,1 mSv | 8 personnes |
| — 0,1 à 5 mSv | 4 personnes |
| — 5 à 10 mSv | 5 personnes |
| — 10 à 30 mSv | 3 personnes |

VI.6 – RADIOPROTECTION HORS SITES D'EXPÉRIMENTATIONS

Le commandant du Goen prenait la décision d'effectuer un essai lorsque les prévisions météorologiques conduisaient à écarter tout risque de passage de l'axe du nuage radioactif à proximité d'une île habitée ou tout risque de retombée directe sur une île habitée, en particulier les plus proches : Tureia, Reao, Pukarua et celles de l'archipel des Gambier. Ces prévisions devaient montrer que l'essai serait effectué dans des conditions météorologiques favorables, limitant les retombées sur le territoire polynésien et que les doses reçues par les populations seraient d'un niveau très en deçà des limites réglementaires en vigueur.

VI.6.1 – PRÉVISIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Pendant l'hiver austral, la circulation générale dominante des masses d'air est dirigée d'ouest en est dans l'hémisphère Sud, à l'exception de la zone équatoriale où la direction dominante est inversée (cf. Chapitre I). En été, elle est orientée d'est en ouest, de vitesse faible en général, un peu plus rapide des basses latitudes jusqu'à l'équateur. L'hiver austral a été retenu pour réaliser les essais pour les vents d'ouest en altitude et pour les alizés qui soufflent de l'est dans les basses couches de l'atmosphère, éloignant, en particulier, les retombées locales provenant du bas du pied du nuage du secteur Est de l'atoll de Mururoa (cf. Chapitre II).

Les directions et intensités des vents étaient fournies par un important dispositif de recueil et d'exploitation des données météorologiques qui s'appuyait sur les experts et les réseaux de la météorologie nationale, complétés par des moyens militaires. Une connaissance des champs de vents suffisamment fine permettait de prévoir les trajectoires les plus probables du nuage radioactif.

Les données météorologiques collectées permettaient l'élaboration de cartes de prévisions météorologiques en Polynésie française et, plus particulièrement, de la région de Mururoa et Fangataufa, aux échelles 1/9 000 000 et 1/12 500 000. Elles fournissaient également les données nécessaires à la prévision des retombées, pour plusieurs gammes de puissance, afin d'apprécier les conséquences d'une explosion d'une puissance différente de celle attendue.

VI.6.2 – PRÉVISIONS DES RETOMBÉES ET DES DÉBITS DE DOSE

Avant tout essai, une série de prévisions des conséquences radiologiques régionales était faite à partir de modélisations permettant d'évaluer les activités atmosphériques, les dépôts et les débits de dose ambiante. Les vitesses et directions de vent à différentes altitudes, la distribution des tailles des particules et des vitesses de chute associées devaient être connues pour prévoir les fronts des retombées et les débits de dose au sol. Les méthodes de prévision des retombées des essais atmosphériques, à partir du nuage stabilisé, sont décrites en détail dans le chapitre II. Les prévisions de la trajectoire du nuage étaient calculées, pour chaque essai, 48, 24, 12 et 6 heures avant la date et l'heure prévues de l'essai, faisant l'objet de représentations cartographiques.

Pour chaque simulation, les points de retombées au sol de même temps de transport étaient reliés par des lignes d'iso-valeurs appelées isochrones et superposées sur la carte de la Polynésie française. Chaque isochrone représentait le front des retombées, pour un même temps de transport, jusqu'à leurs dépôts au sol.

Les activités volumiques et surfaciques, débits de dose et doses en surface étaient également calculés en un grand nombre de points pour tracer les courbes d'iso-débit de dose sur les mêmes cartes. Si la situation était considérée comme favorable, c'est-à-dire qu'aucune retombée n'était prévue sur un lieu habité, il était procédé la veille au soir du jour prévu de l'essai, au dernier stade de la préparation appelé «passage du Rubicon» (embarquement de l'état-major, évacuation des personnels, appareillage de l'ensemble des bâtiments).

Si la situation météorologique évoluait de manière défavorable, l'essai était différé, de quelques heures à une journée au plus. Si la situation défavorable persistait, l'ensemble du dispositif revenait à l'état antérieur, dans une situation dite «Pénélope» qui consistait, dans le cas des essais sous ballon, à descendre le ballon pour remettre l'engin en position de sécurité, dans l'attente d'une situation favorable.

Après la réalisation de l'essai, de nouvelles prévisions de retombées et de débit de dose étaient faites en prenant en compte la puissance réelle de l'engin, ainsi que la situation météorologique réelle, observée pendant et après l'essai.

VI.6.3 – DÉFINITION DES ZONES D'EXCLUSION

Lors d'un essai atmosphérique, l'environnement proche du point zéro était soumis à des effets thermiques, mécaniques et aux effets des rayonnements ionisants. Pour s'en protéger, trois zones étaient définies selon la terminologie de l'époque (Fig. 183) :

- une zone interdite à la circulation nautique et aérienne, située dans un cercle de 10 milles nautiques de rayon centré sur le point zéro ;
- une zone dangereuse pour la circulation nautique, située dans un cercle de 120 milles nautiques de rayon centré sur le point zéro, complété par un secteur circulaire s'étendant jusqu'à 200 milles nautiques (400 milles nautiques en 1966) ;
- une zone dangereuse pour la circulation aérienne, située dans un cylindre de 200 milles nautiques de rayon, centré sur le point zéro et de hauteur illimitée, complété par un secteur cylindrique s'étendant de 200 à 500 milles nautiques du point zéro.

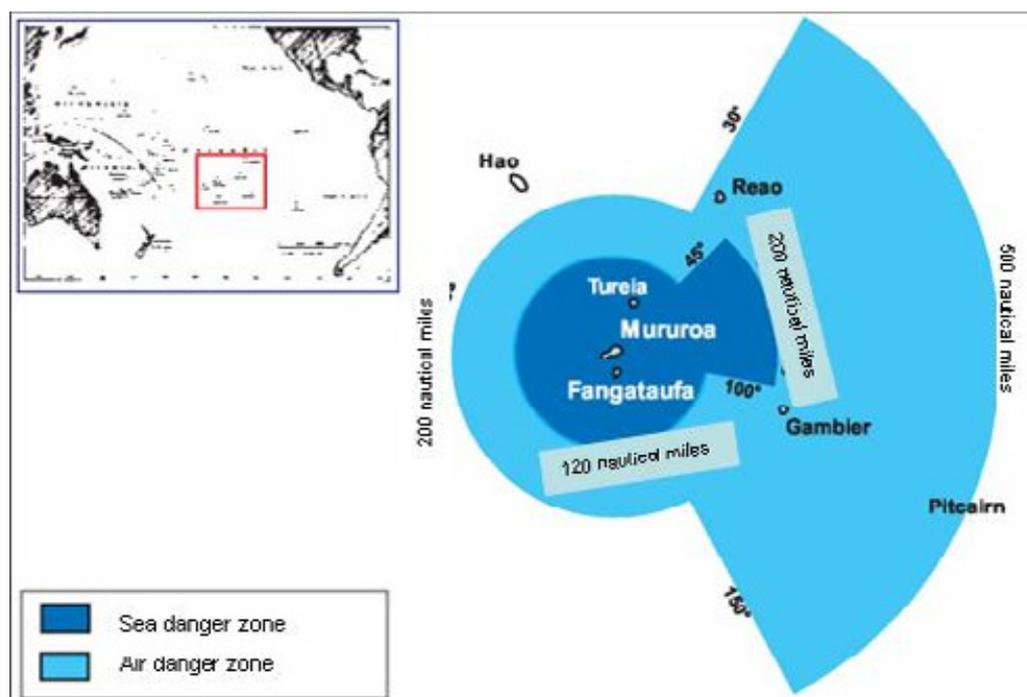


FIG. 183 – Les zones de restriction à la circulation nautique et aérienne définies pour la réalisation d'un essai atmosphérique au CEP.

Au moment de l'essai, pour assurer une protection contre les effets mécaniques, thermiques et les effets de l'exposition aux retombées du nuage radioactif, les bateaux étaient positionnés à une distance du point zéro dite «distance de sécurité». Cette distance de quelques dizaines de milles dépendait de l'énergie attendue lors de l'explosion de l'engin testé, du mode d'expérimentation et des conditions météorologiques. À cette distance et pour parer aux effets du flash lumineux, le personnel devait tourner le dos à l'explosion et mettre la tête dans les

bras ou porter des lunettes anti-flash. Ce flash pouvait être perçu jusqu'à 100 milles nautiques à partir des bateaux et 200 milles nautiques à partir des avions.

VI.6.4 – PROCESSUS DE DÉCISION DE DÉCLENCHEMENT D'UN ESSAI

Lorsque les prévisions météorologiques préalables prévoyaient des conditions susceptibles d'entraîner des retours anticycloniques vers l'ouest, ou des entrées d'air stratosphérique vers la troposphère, l'essai était reporté. Les calculs déterminants étaient ceux réalisés le jour précédant l'essai, donnant les prévisions de la situation météorologique à l'heure prévue de l'essai et des 24 heures suivantes. Ces prévisions prenaient en compte les possibilités de pluies, susceptibles de rabattre les radionucléides au sol.

La sécurité des populations étant une préoccupation majeure, la décision d'effectuer un essai était prise lorsque les prévisions de retombées sur les terres habitées, voisines des sites d'expérimentations, ne faisaient apparaître aucune retombée pouvant induire des doses aux populations supérieures aux limites réglementaires et après vérification de l'absence d'intrusion à l'intérieur de la zone dangereuse.

Pour les deux essais mégatonniques exécutés en 1968, compte tenu du niveau d'activité possible de retombées, la CCS avait prescrit au Commandant du Goen de n'autoriser l'essai que si la courbe d'iso-débit de dose de 1 mGy.h^{-1} (calculée à H+1) des retombées se situait à plus de 100 km de Reao ou des îles de l'archipel des Gambier.

VI.6.4.1 – GESTION D'UNE SITUATION IMPRÉVUE

Malgré toutes les précautions prises, il ne pouvait être exclu qu'une évolution météorologique après l'essai, entraîna des retombées sur une île habitée. Aussi, par précaution, des mesures préventives de protection radiologique étaient prises vis-à-vis des populations des îles susceptibles d'être atteintes par une retombée. Ces mesures de protection avaient trois objectifs :

- protéger les personnes pendant la période des retombées ;
- prévoir les moyens d'évacuation en cas de retombées importantes ;
- réduire l'exposition des personnes à un niveau de dose aussi bas que possible.

Pour protéger la population des conséquences d'éventuelles retombées plus importantes que celles initialement prévues, des abris de prévoyance avaient été construits à Tureia pour la campagne de 1966, à Reao, Pukarua ainsi qu'aux Îles Gambier en 1967 en prévision des essais mégatonniques. La population concernée était systématiquement rassemblée à proximité des abris avant l'essai et la décision d'y séjourner était prise, soit en prévision de l'arrivée d'une retombée, soit à la suite de la détection d'une augmentation de la radioactivité.

En cas de retombée sur une île habitée, il était prévu d'évaluer la dose susceptible d'être reçue par une personne séjournant un an sur cette île. Cette dose devait être calculée en tenant compte des mesures palliatives pouvant être mises en oeuvre. Elle devait ensuite être comparée aux critères radiologiques définis par la CCS. Ainsi, il avait été prévu que :

- Dans l'hypothèse d'une dose efficace annuelle inférieure à 50 mSv, la population reviendrait à une vie normale et pourrait être amenée à mettre en oeuvre des mesures simples de protection.

- Dans l'hypothèse d'une dose efficace annuelle comprise entre 50 et 150 mSv, la population serait rendue à ses activités, mais devrait respecter les consignes de sécurité des services de protection afin de limiter l'exposition aux rayonnements pendant le retour progressif à la vie normale.
- Dans l'hypothèse d'une dose efficace annuelle comprise entre 150 et 250 mSv, les risques d'une évacuation et d'une exposition aux rayonnements seraient comparés. Cette comparaison conduirait, soit à l'évacuation des populations, soit à une reprise des activités de la population, dans le respect des consignes de sécurité rigoureuse concernant en particulier l'alimentation.
- Enfin, au-delà de 250 mSv, l'évacuation des populations, du personnel militaire et des expérimentateurs civils aurait été automatiquement effectuée.

En 1968, année des premiers essais mégatonniques, les populations de Reao et des îles Gambier ont été systématiquement mises sous abri avant chaque essai.

Le porte-avions Clémenceau était gréé pour assurer, si nécessaire, l'évacuation des atolls de Reao, Pukarua et de l'archipel des Gambier et le TCD Ouragan celle de l'atoll de Tureia.

VI.6.4.2 – EXEMPLE DE L'ESSAI CENTAURE

Cet essai a été pris comme exemple car il a fait l'objet d'une évaluation radiologique particulière pour Tahiti parce que les retombées observées n'ont pas été conformes aux prévisions.

Caractéristiques de l'essai

L'essai Centaure prévu initialement le 2 juillet 1974 a eu lieu le 17 juillet, à 8h00, heure locale. Ce report est lié à l'attente de conditions météorologiques favorables à l'essai. D'une puissance de 4 kt, il a été réalisé sous ballon, à 270 m d'altitude. Les prévisions de retombées et des débits de dose ont été établies sous la forme de cartes d'isochrones et d'iso-débits de dose, 24 heures et 12 heures avant l'heure prévue de l'essai. Celui-ci a été effectué à la limite Nord d'une cellule anticyclonique en voie d'affaiblissement, de centre situé approximativement à 24° de latitude S et 140° de longitude W. La direction des vents des basses couches était de 120° à 130° avec une vitesse de 5 m.s⁻¹, tendant à faiblir dans la journée.

Prévisions des isochrones et débits de dose

Vingt-quatre heures avant l'heure prévue de l'essai, les isochrones et les iso-débits de dose prévoient la trajectoire des retombées vers le nord, aucune île habitée n'étant touchée par les retombées directes (Fig. 184). Ces prévisions indiquaient que l'atoll d'Hao aurait été frôlé par l'iso-débit de dose 10 µGy.h⁻¹, valeur non corrigée de la décroissance radioactive des radionucléides transportés dans le nuage (cf. Chapitre II). L'arrivée des retombées sur cet atoll ayant été estimée à plus de 20 heures après l'heure de l'essai, le débit de dose maximum enregistré aurait été de l'ordre de 270 nGy.h⁻¹, soit un débit de dose très inférieur à la limite de 1 mGy.h⁻¹ préconisée par la CCS. Les prévisions répondaient donc aux conditions requises du déclenchement de l'essai.

Compte tenu des paramètres météorologiques, 12 heures avant l'heure prévue de l'essai, une nouvelle prévision de l'évolution des retombées et des débits de dose sur 24 heures avait permis de tracer les nouvelles isochrones et courbes d'iso-débits de dose (Fig. 185).

Cette nouvelle prévision était cohérente avec celle effectuée 24 heures avant l'heure prévue de l'essai et confirmait l'absence de retombées significatives sur les îles habitées. Le débit de dose maxi-mum attendu sur l'atoll d'Hao était estimé à 630 nGy.h^{-1} et la dose annuelle intégrée était évaluée à $50 \text{ }\mu\text{Gy}$. Ces prévisions conduisaient à des retombées et des débits de dose suffisamment faibles et conformes aux conditions d'autorisation de l'essai.

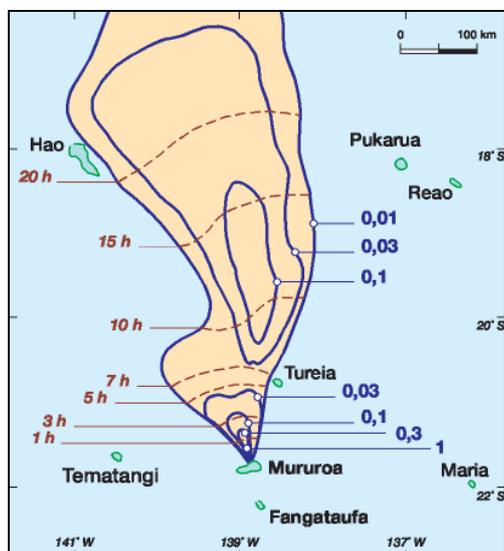


FIG. 184. L'essai Centaure : prévisions des retombées réalisées 24 heures avant l'heure prévue de l'essai. Les débits de dose (mGy.h^{-1}) ne sont pas corrigés de la décroissance radioactive.

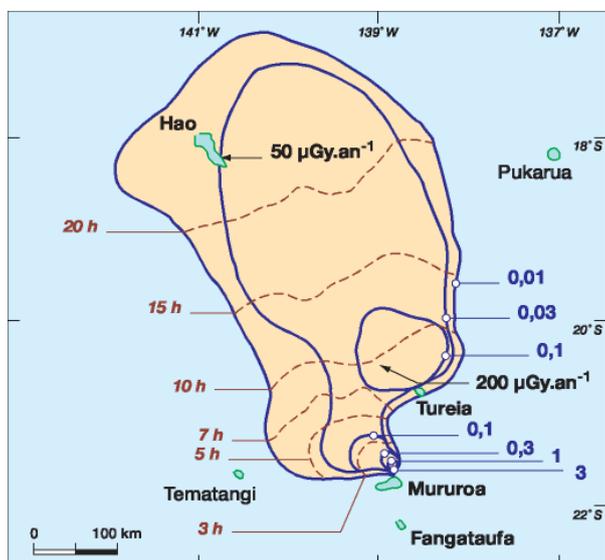


FIG. 185. L'essai Centaure : prévisions des retombées réalisées 12 heures avant l'heure prévue de l'essai. Les débits de dose (mGy.h^{-1}) ne sont pas corrigés de la décroissance radioactive.

Trajectoires réelles du nuage

Une fois l'essai réalisé, les conditions météorologiques se sont avérées différentes de celles prévues. Un fléchissement des vents vers l'ouest en altitude a été observé et la modélisation des nouvelles trajectoires des retombées avec les conditions météorologiques observées a conduit à recalculer les isochrones et les iso-débits de dose (Fig. 186). Les estimations ont montré que les retombées devaient toucher l'île de Tematangi près de 10 heures après l'essai, avec un débit de dose maximum de $630 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$, soit une valeur inférieure à la limite définie par la CCS. Le changement de direction des vents a eu pour conséquence d'emmener le nuage radioactif vers l'ouest de la Polynésie.

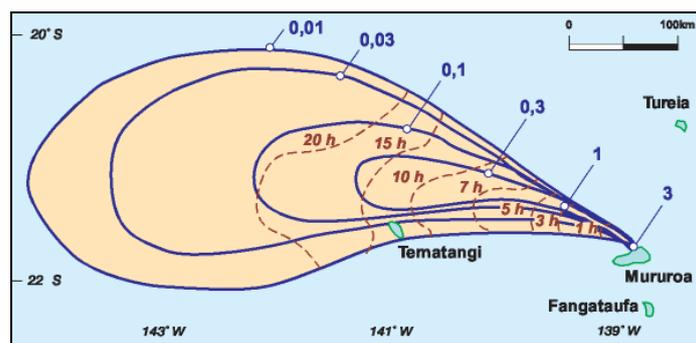


FIG. 186. L'essai Centaure : estimation des retombées réalisées après l'essai. Les débits de dose ($\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$) ne sont pas corrigés de la décroissance radioactive.

VI.6.5 – SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DES POPULATIONS

Après chaque essai, une estimation de l'exposition des populations des îles les plus proches des sites d'expérimentations était faite par les spécialistes du SMSR et du SMCB, à partir de l'ensemble des résultats de mesures effectuées dans les différents compartiments de l'environnement et de la chaîne alimentaire (cf. Chapitre III). En 2005 et 2006, de nouvelles estimations ont été faites par les spécialistes de la DAM du CEA. Avant de présenter le résultat de ces estimations, les paragraphes suivants rappellent la méthodologie employée pour le calcul des doses. Si la méthodologie appliquée par les équipes durant la période des essais atmosphériques est proche de celle appliquée en 2005-2006, les modèles ont évolué et les valeurs des paramètres utilisés par ces modèles sont aujourd'hui mieux connues et confortées par de nombreuses études, expériences de laboratoire et observations de terrain. C'est le cas des facteurs de transfert environnementaux (cf. Chapitre II) et des coefficients permettant d'estimer les doses par exposition externe ou par exposition interne.

Dans la suite de ce chapitre, conformément aux textes réglementaires les plus récents, les doses sont exprimées sous les termes de doses efficaces et de doses à la thyroïde pour différentes classes d'âge de la population. Les qualificatifs «équivalente» et «engagée» sont sous-entendus.

Ces doses peuvent être calculées pour différentes classes d'âge de la population. Six classes d'âge ont été prises en compte dans les calculs de dose : les nourrissons d'âge inférieur à 1 an, les enfants de 1 à 2 ans, les enfants de 2 à 7 ans, les enfants de 7 à 12 ans, les enfants de 12 à 17 ans et les adultes.

Seuls sont présentés, ici, les résultats pour les adultes et pour les enfants de 1 à 2 ans auxquels sont délivrées les doses à la thyroïde les plus élevées.

VI.6.5.1 – MÉTHODOLOGIE DES CALCULS DE DOSE

Les doses reçues par les populations résultent des expositions dues :

- au passage du nuage ;
- aux dépôts des radionucléides associés aux retombées ;
- à l'inhalation de radionucléides pendant le passage du nuage, la faiblesse des remises en suspension due au climat humide n'augmentant pas les doses après le passage du nuage ;
- à l'ingestion de radionucléides présents dans les eaux de boisson, dans les produits de la pêche et dans les produits agricoles locaux.

Les doses délivrées aux populations à la suite des essais atmosphériques ont été estimées à partir de résultats de mesures. Ces mesures effectuées dans les différents milieux de l'environnement et dans la chaîne alimentaire concernaient l'indice bêta global, ou encore l'activité totale, selon la terminologie de l'époque.

Le spectre des radionucléides à l'origine de cet indice bêta global a été déduit du bilan des radionucléides produits par l'essai nucléaire étudié, après prise en compte de la décroissance et de la filiation de chaque radionucléide, en supposant que le transport atmosphérique n'ait provoqué aucune modification du spectre initial décrit dans le nuage stabilisé.

Sur les 1 300 isotopes inventoriés à la suite d'un essai nucléaire, 1 000 environ sont radioactifs et seuls quelques dizaines, qui contribuent majoritairement à l'indice bêta global ont été sélectionnés pour composer le spectre retenu afin d'exploiter les résultats de mesure d'indice bêta global.

Activité atmosphérique et dépôt au sol

Parmi l'ensemble des résultats des mesures d'activité effectuées après un essai figuraient ceux des aérosols atmosphériques et des dépôts au sol. Dans certains cas, ces résultats de dépôt font défaut ou sont insuffisamment documentés, mais ils peuvent éventuellement être déduits des valeurs d'activité des aérosols atmosphériques. Inversement, lorsque les données d'activité des aérosols manquent, elles peuvent être déduites des activités déposées au sol.

La plupart du temps, la granulométrie des aérosols, n'est pas connue précisément. Cependant, les observations faites lors des essais atmosphériques ont montré que la répartition des tailles de particules dépendait de la durée du transport atmosphérique, de la pluviométrie et de la puissance de l'essai.

En effet, les particules se déposent d'autant plus facilement qu'elles sont denses. En conséquence, plus la distance parcourue par le nuage est importante, plus les particules restant dans le nuage sont légères et plus leur vitesse de dépôt est faible.

Par temps sec, les particules se déposent sur le sol :

- par gravité ;
- par turbulence dans la couche limite entre l'air et le sol ou la surface de l'eau ;
- par interaction avec la surface de dépôt caractérisée par sa «rugosité» qui dépend du relief et de l'occupation de la surface.

Par temps de pluie, les particules se déposent en beaucoup plus grand nombre, jusqu'à 100 fois plus, par lessivage de l'atmosphère par les précipitations. Les caractéristiques de la pluie conditionnent l'efficacité du lessivage : hauteur d'eau, durée des précipitations et hauteur de la colonne de lessivage. Le dépôt peut donc croître très fortement avec la pluie.

Enfin, les observations effectuées à la suite des essais ont montré que la taille des particules, diminuait avec la puissance de l'essai. Il s'agit cependant d'une relation de second ordre comparée aux deux précédentes : la distance de transport et la pluviométrie.

C'est sur la base de ces critères que les vitesses de dépôt sont déterminées. Elles sont généralement comprises dans un intervalle de $5 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$. Dans le cas, où un intervalle de valeurs est pris en compte, les résultats des calculs de dose sont également exprimés sous la forme d'un intervalle dont la borne inférieure correspond à la vitesse de dépôt la plus forte et la borne supérieure à la vitesse de dépôt la plus faible.

Doses dues à l'inhalation d'aérosols radioactifs

La dose due à l'inhalation d'aérosols radioactifs est calculée comme la somme des produits de l'activité volumique de chaque radionucléide intégrée, sur la durée du passage du nuage radioactif, par le débit respiratoire et par la dose par unité d'incorporation. La dose par unité d'incorporation (DPUI) dépend de la nature, de la forme physique et de la forme chimique du radionucléide, ainsi que de l'âge de l'individu qui inhale l'aérosol radioactif. Le débit respiratoire dépend également de l'âge de l'individu.

La dose due à l'inhalation des particules radioactives pour un individu d'une classe d'âge j est obtenue à partir de la formule suivante :

$$D_j^{inh} = F_p \cdot \sum_i A_i \cdot R_j \cdot DPUI_{ij}$$

où :

A_i est l'activité volumique intégrée du radionucléide i ($\text{Bq.m}^{-3} \cdot \text{s}$) ;

R_j est le débit respiratoire d'un individu de classe d'âge j ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ;

$DPUI_{ij}$ est la dose par unité d'incorporation pour le radionucléide i et un individu de classe d'âge j (Sv.Bq^{-1}) ;

F_p est un paramètre compris entre 0 et 1 qui permet de prendre en compte la protection apportée par un équipement particulier, une habitation, un temps de présence inférieur à celui du passage du nuage.

Le passage du nuage radioactif se traduit par une activité volumique de l'air exprimée en Bq.m^{-3} qui dépend du temps. L'activité volumique intégrée A_i est le résultat de l'intégration de l'activité volumique sur la durée τ du passage du nuage.

$$A_i = \int_0^T a_i(t) \cdot dt$$

où :

$a_i(t)$ est l'activité volumique du radionucléide i (Bq.m^{-3}) ;

T est la durée du passage du nuage (s).

L'aérosol est représenté par un ensemble de particules de densité égale à 1 supposées sphériques et dont les diamètres sont répartis suivant une loi dite «log-normale» dont la médiane est le «diamètre aérodynamique médian». Ce diamètre est un paramètre qui

conditionne, d'une part, la valeur de la vitesse de dépôt et, d'autre part, la valeur de la DPUI. En effet, les particules de plus grand diamètre sont piégées par le système respiratoire supérieur (nez et pharynx), puis dégluties alors que les particules de plus petite taille pénètrent dans le système respiratoire profond (bronches et alvéoles pulmonaires) et peuvent alors passer la barrière pulmonaire et diffuser dans l'ensemble de l'organisme. La DPUI est donc d'autant plus élevée que la taille de la particule est petite.

La DPUI est déterminée pour chaque radionucléide en appliquant un modèle métabolique qui représente son comportement dans l'organisme, en prenant en compte la part de l'activité incorporée dans chacun des organes et le temps d'élimination de ce radionucléide par l'organe. La dose absorbée à un organe est d'autant plus élevée que le radionucléide y reste longtemps. Le temps de présence du radionucléide dépend de sa nature, de sa forme chimique ainsi que de l'âge de l'individu. Les formes chimiques sont réparties en trois classes qui caractérisent le temps de présence du radionucléide dans l'organisme : lent, moyen et rapide. En absence d'information sur sa forme chimique, la forme la plus pénalisante en termes de dose est choisie.

Doses dues à l'exposition externe

Doses dues à l'immersion dans le nuage

Ces doses sont calculées connaissant les activités volumiques atmosphériques intégrées et le temps de présence des individus dans le nuage.

La dose efficace due à l'exposition externe aux émetteurs β et γ du nuage radioactif est égale à la somme des produits de l'activité volumique intégrée par le coefficient de dose efficace par immersion pour chaque radionucléide présent dans le nuage.

$$D^{ext,p} = F_p \cdot \sum_i A_i \cdot CD_i^{ext,p}$$

où :

A_i est l'activité volumique intégrée du radionucléide i ($Bq \cdot m^{-3} \cdot s$) ;

$CD_i^{ext,p}$ est le coefficient de dose efficace en Sv pour une immersion dans une activité volumique intégrée unitaire du radionucléide i ($Sv \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1} \cdot m^3$) ;

F_p est un paramètre compris entre 0 et 1 qui permet de prendre en compte la protection apportée par un équipement particulier, une habitation, un temps de présence inférieur à celui du passage du nuage.

Cette dose ne dépend pas de l'âge de l'individu.

Doses dues à l'exposition au dépôt

L'exposition due au dépôt peut être calculée soit à partir des mesures de débits de dose dus au dépôt, soit estimée à partir de l'activité du dépôt. Dans ce dernier cas, la dose due au dépôt est évaluée par intégration sur différentes durées compte tenu de la décroissance radioactive et du spectre des radionucléides présents. Le débit de dose est exprimé en $Sv \cdot h^{-1}$ et égal à la somme, pour tous les radionucléides, des produits du débit du dépôt exprimé en $Bq \cdot m^{-2}$ par le coefficient de dose efficace pour la voie «exposition externe due au dépôt» exprimé en $Sv \cdot h^{-1} \cdot Bq^{-1} \cdot m^2$, c'est à dire le débit de dose unitaire pour une activité surfacique de $1 Bq \cdot m^{-2}$ en géométrie infinie. Le débit de dose $D_i^{ext,d}$ dû au dépôt du radionucléide i est donc égal à :

$$D_i^{ext,d} = D_i \cdot CD_i^{ext,d}$$

où :

D_i est le dépôt du radionucléide i (Bq.m^{-2}) ;

$CD_i^{ext,d}$ est le coefficient de dose efficace ($\text{Sv.h}^{-1}.\text{Bq}^{-1}.\text{m}^2$).

La dose est évaluée en prenant en compte la décroissance radioactive et en intégrant le débit de dose sur la durée de présence τ de l'individu, sur le dépôt, à partir de la fin des retombées ($t = 0$) :

$$D^{ext,d} = F_p \cdot \sum_i D_i^{ext,d} \cdot \frac{(1 - \exp(-\lambda_i T))}{\lambda_i}$$

où :

λ_i est la constante de décroissance radioactive du radionucléide i (s^{-1}) ;

$D_i^{ext,d}$ est le débit de dose dû au radionucléide i (Sv.s^{-1}) ;

F_p est un paramètre compris entre 0 et 1 qui permet de prendre en compte la protection apportée par un équipement particulier, une habitation, un temps de présence inférieur à celui du passage du nuage ;

T est la durée d'intégration du débit de dose (s).

Ces doses ne dépendent pas de l'âge de l'individu.

Doses dues à l'ingestion de produits alimentaires

Ce sont les doses dues à la consommation de produits alimentaires locaux touchés par les retombées radioactives. Ces doses sont exprimées en termes de doses efficaces et de doses à la thyroïde, pour différentes classes d'âge de la population.

Les calculs de dose par ingestion utilisent les activités effectivement mesurées dans les aliments ou les activités estimées à partir des résultats de mesure du dépôt au sol ou de son estimation qui peut être faite à partir de l'activité des aérosols atmosphériques et des eaux de pluie. Le spectre des radionucléides dans les différents aliments à la date considérée de consommation est supposé identique à celui des dépôts calculés à partir de l'évolution dans le temps du spectre des produits de fission. La dose (D_k^{ing}) due à l'ingestion d'aliments pour une classe d'âge donnée (k) est la somme pour les radionucléides présents (i), des produits de l'activité massique de l'aliment (j) par la quantité consommée et par la dose par unité d'incorporation $DPUI_{ik}$:

$$D_k^{ing} = \sum_i \sum_j B_{ij} \cdot DPUI_{ik} \cdot Q_{jk}$$

où:

Q_{jk} est la quantité (en kg) quotidienne d'aliments (j) consommés par un individu de la classe d'âge (k). L'ensemble des valeurs Q_{jk} représente la ration alimentaire. C'est un paramètre important qui influe sur la dose calculée. Cette ration alimentaire comprend les consommations de boissons, poissons, viandes, œufs, mollusques, crustacés, coprah, fruits et légumes. Différentes rations alimentaires ont été retenues compte tenu des habitudes alimentaires spécifiques des différents archipels de Polynésie.

$DPUI_{ik}$ est la dose par unité d'incorporation (ingestion) pour le radionucléide i et la classe d'âge k , exprimée en sievert par becquerel (Sv.Bq^{-1}) ingéré. Cette dose dépend uniquement du radionucléide et de la classe d'âge.

B_{ij} est l'activité du radionucléide i dans l'aliment j (Bq.kg^{-1}).

Les doses efficaces sont finalement établies en sommant, pour une même classe d'âge de la population, les doses efficaces dues à l'inhalation d'aérosols radioactifs, à l'ingestion d'aliments et à l'exposition externe. Les doses à la thyroïde, pour une même classe d'âge de la population, sont établies en sommant les doses à la thyroïde dues à l'inhalation d'aérosols radioactifs et celles dues à l'ingestion d'aliments.

Coefficients de doses utilisés

Le calcul des doses efficaces dues à l'inhalation et à l'ingestion utilisent les DPUI précisées par l'arrêté du 1^{er} septembre 2003, définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants. Pour les doses efficaces dues à l'inhalation, les cinétiques retenues en relation avec la forme chimique des radionucléides sont celles recommandées dans la Directive européenne 96/29 Euratom du 13 mai 1996 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, ou dans les publications 71 «age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides : Part 4, Inhalation dose coefficients, Vol 25 n°3-4, 1995» et 72 «age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides : Part 5, compilation of ingestion and inhalation dose coefficients, Vol. 26 n° 1, 1996» de la CIPR.

Pour le calcul des doses absorbées à la thyroïde dues à l'inhalation et à l'ingestion, les DPUI proviennent des publications 71 et 72 de la CIPR. Les classes d'âge et les débits respiratoires retenus proviennent de la publication 66 de la CIPR.

Pour l'exposition externe par immersion dans le panache et par les dépôts, les coefficients de dose proviennent du rapport «U.S. Environmental Protection Agency, Federal Guidance report 12, External exposure to radionuclides in air, water and soil. EPA-402-R93-081».

VI.6.5.2 – RATIONS ALIMENTAIRES

Des rations alimentaires ont été établies pour les adultes sur la base d'enquêtes alimentaires et nutritionnelles représentatives de la consommation des produits locaux par les populations polynésiennes. Ces enquêtes, effectuées en 1965 et 1985, ont mis en évidence les habitudes alimentaires des différents archipels (Gambier, Tuamotu, Australes, Marquises et Tahiti) et ne tiennent pas compte des produits importés, comme le riz ou les conserves.

Les rations alimentaires présentées dans les tableaux 55 à 57 ont été établies pour les adultes et les enfants de 1 à 2 ans de Tureia, des Îles Gambier, de Tahiti, en dehors de Papeete (population rurale), et de Papeete (population urbaine), sur la base des enquêtes alimentaires et nutritionnelles indiquées ci-dessus. Les rations alimentaires des enfants ont été extrapolées des rations alimentaires établies pour les adultes. Les quantités indiquées sont en grammes et par jour.

Tableau 55. Rations alimentaires (g.jour⁻¹) établies pour Tureia.

| Catégorie alimentaire | Aliments | Consommation adulte | Consommation enfant de 1 à 2 ans |
|-----------------------|--------------|---------------------|----------------------------------|
| Boissons | Eau | 1 000 | 500 |
| | Eau de coco | 2 000 | 1 000 |
| Poissons | Haute mer | 30 | |
| | Lagon | 440 | |
| | Total | 470 | 150 |
| Viandes | Poulet | 10 | |
| | Porc | 10 | |
| | Chien | 10 | |
| | Total | 30 | 10 |
| Mollusques | Turbo | 60 | |
| | Bénitier | 100 | |
| | Poulpe | 30 | |
| | Total | 190 | 30 |
| Crustacés | Langouste | 20 | |
| Coprah | | 220 | |
| Fruits (arbres) | Banane | 50 | |
| | Papaye | 60 | |
| | Arbre à pain | 60 | |
| | Total | 170 | 30 |

Tableau 56. Rations alimentaires (g.jour⁻¹) établies pour Tahiti.

| Catégorie alimentaire | Aliments | Population urbaine | | Population rurale | |
|-----------------------|--------------|--------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| | | Adultes | Enfants de 1 à 2 ans | Adultes | Enfants de 1 à 2 ans |
| Boissons | Eau | 2 700 | 1 000 | 1 000 | 500 |
| | Eau de coco | | | 2 000 | |
| | Lait | 300 | 500 | 300 | 500 |
| Poissons | Thon | 13 | | | |
| | Bonite | 106 | | | |
| | Ature | 18 | | | |
| | Inaa | 5 | | | |
| | Haute mer | | | 30 | |
| | Lagon | | | 440 | |
| Total | 231 | 100 | 380 | 100 | |
| Viandes | Poulet | 1 | | 10 | |
| | Porc | 49 | | 10 | |
| | Boeuf | 28 | | | |
| | Chien | | | 10 | |
| | Total | 78 | 20 | 30 | 10 |
| Mollusques | Turbo | 15 | 5 | 60 | |
| | Bénitier | 15 | 5 | 100 | |
| | Autres | | | 30 | |
| | Total | 30 | 10 | 190 | 30 |
| Crustacés | Langouste | | | 20 | |
| Coprah | | 6 | | 220 | |
| Fruits (arbres) | Banane | 40 | | 50 | |
| | Papaye | 12 | | 60 | |
| | Citron | 19 | | | |
| | Mangue | 32 | | | |
| | Avocat | 6 | | | |
| | Pamplemousse | 5 | | | |
| | Arbre à pain | 28 | | 60 | |
| | Autres | 52 | | | |
| | Total | 194 | | 170 | |
| Fruits | Ananas | 28 | | | |

| Catégorie alimentaire | Aliments | Population urbaine | | Population rurale | |
|----------------------------------|--------------|--------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| | | Adultes | Enfants de 1 à 2 ans | Adultes | Enfants de 1 à 2 ans |
| (herbacées) | Tomate | 28 | | | |
| | Concombre | 17 | | | |
| | Aubergine | 3 | | | |
| | Autres | 164 | | | |
| | Total | 240 | | | |
| Légumes feuilles | Salade | 20 | | | |
| | Chou | 18 | | | |
| | Poireau | 3 | | | |
| | <i>Fafa</i> | 2 | | | |
| | Autres | 20 | | | |
| | Total | 63 | 30 | 63 | 30 |
| Racines et tubercules | <i>Taro</i> | 48 | | | |
| | Patate douce | 26 | | | |
| | <i>Tarua</i> | 13 | | | |
| | Navet | 12 | | | |
| | Carotte | 10 | | | |
| | Autres | 6 | | | |
| | Total | 115 | | | |

Tableau 57. Rations alimentaires (g.jour⁻¹) établies pour les îles Gambier.

| Catégorie alimentaire | Aliments | Consommation adulte | Consommation enfant de 1 à 2 ans |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------------------|
| Boissons | Eau | 1 000 | 1 000 |
| | Eau de coco | 2 000 | |
| Poissons | Haute mer | 80 | |
| | Lagon | 300 | |
| | Total | 380 | 100 |
| Viandes | Poulet | 40 | |
| | Porc | 40 | |
| | Total | 80 | |
| Mollusques | Turbo | 15 | |
| | Bénitier | 30 | |
| | Autres | 15 | |
| | Total | 60 | 10 |
| Crustacés | Langouste | 40 | |
| Coprah | | 150 | |
| Fruits (arbres) | Banane | 100 | |
| | Papaye | 50 | |
| | Arbre à pain | 100 | |
| | Autres | 50 | |
| | Total | 300 | |
| Fruits (herbacées) | Tomate | 40 | |
| | Concombre | 40 | |
| | Autres | 20 | |
| | Total | 100 | |
| Légumes feuilles | Salade | 30 | |
| | Chou | 10 | |
| | <i>Fafa</i> | 30 | |
| | Total | 70 | 15 |
| Racines et tubercules | <i>Taro</i> | 70 | |
| | Patate douce | 70 | |
| | Manioc | 100 | |
| | Total | 240 | |

Cette méthodologie de calcul des doses est une méthodologie standard dont la base, même représentée par les modèles et les paramètres utilisés, amène à calculer des doses surestimées, voire très surestimées, par rapport à la réalité. C'est un principe toujours mis en pratique lorsqu'il s'agit d'estimer des doses dues à une exposition à des rayonnements ionisants. Les valeurs de dose obtenues doivent donc être considérées comme maximales.

VI.6.6 - ÉVALUATIONS RADIOLOGIQUES

Chaque essai nucléaire atmosphérique de Polynésie française a été mis en œuvre avec un maximum de précautions, afin que son impact radiologique soit le plus faible possible. Le nombre réduit et la faible puissance globale des essais ont également contribué à en limiter significativement les impacts. Néanmoins, tous ont entraîné la dispersion d'aérosols et de gaz radioactifs dans les hautes couches de l'atmosphère et donc des retombées d'aérosols radioactifs de très faibles niveaux sur de très larges surfaces, induisant de très faibles doses aux populations. Avant la création du CEP, la Polynésie française avait été l'objet de retombées radioactives dues aux essais des autres puissances nucléaires. Les retombées des essais atmosphériques effectués au CEP, entre 1966 et 1974, lorsque les conditions météorologiques réelles étaient conformes aux prévisions, avaient un impact radiologique extrêmement faible. Cependant, lorsque les conditions météorologiques divergeaient des prévisions, les retombées des essais pouvaient entraîner des retombées plus importantes que prévues sur certaines îles habitées.

Les retombées de dix essais, parmi lesquelles les plus importantes furent celles des essais Aldébaran, Arcturus, Phoebé, Encelade, Rigel et Centaure ont touché les îles suivantes :

- Tureia, atoll le plus proche des sites d'essais (110 km) et peu peuplé (40 habitants au recensement de 1967, et 68 lors de celui de 1971), dont les ressources alimentaires, caractéristiques d'un atoll, étaient très limitées ;
- îles Gambier (516 habitants en 1967, 545 en 1971) qui se trouvent, par rapport à Mururoa, dans une direction voisine de celle des vents dominants en altitude. Elle se situe à une distance intermédiaire des sites d'essais (450 km) et disposait d'une grande variété de productions agricoles ;
- Tahiti, (61 500 habitants en 1967, 74 400 en 1971) qui regroupait alors les deux tiers de la population de la Polynésie. À 1 200 km des sites d'expérimentations, elle dispose d'une grande variété de productions agricoles.

Les résultats représentatifs des mesures effectuées dans les différentes composantes de l'environnement et de la chaîne alimentaire sont présentés pour chacun de ces six essais. Les estimations de doses, calculées selon la méthodologie exposée précédemment, sont également présentées dans les paragraphes suivants, pour chacun des îles ou atolls concernés.

VI.6.6.1 - RETOMBÉES SUR L'ATOLL DE TUREIA

Les retombées sur Tureia ont été consécutives aux essais Rigel du 24 septembre 1966, Arcturus du 2 juillet 1967 et Encelade du 12 juin 1971.



ESSAI RIGEL

L'essai Rigel, d'une puissance de 125 kt, a été réalisé le 24 septembre 1966 à 7h00, heure locale. Il a eu lieu sur une barge ancrée dans le lagon de Fangataufa. Au moment de l'essai, des vents de sud-est d'une vitesse de 5 m.s^{-1} entre le sol et 500 mètres d'altitude, des vents variables et faibles entre 600 et 3 000 mètres d'altitude étaient établis. De 3 000 mètres jusqu'à la stratosphère, les vents venaient de l'ouest avec une vitesse moyenne de 40 m.s^{-1} , atteignant une vitesse de 50 m.s^{-1} vers 12 000 mètres. Environ 12 heures et 30 minutes après le déclenchement de l'essai Rigel, l'île de Tureia enregistrait durant trois heures et trente minutes l'arrivée d'un front de retombées radioactives, dont l'impact était caractérisé par les résultats de mesure et les estimations suivantes.

Atmosphère

L'arrivée des retombées a été accompagnée d'une mesure de l'indice bêta global moyen de l'air sur 24 heures de 11 Bq.m^{-3} , avec un maximum de 355 Bq.m^{-3} . L'indice bêta global des pluies de 16 mm tombées le 26 septembre a été mesuré à $25\,900 \text{ Bq.l}^{-1}$.

Dépôts au sol

L'indice bêta global déposé au sol a été estimé à partir de l'indice bêta global de l'air, associé à une vitesse de dépôt de 10^{-1} m.s^{-1} et de dépôt humide, calculé à partir de l'indice bêta global de l'eau de pluie et des hauteurs de précipitations. Ainsi, le 26 septembre, après les pluies, l'indice bêta global du dépôt est estimé à 5.10^5 Bq.m^{-2} , à Tureia.

Eau de boisson

L'indice bêta global de l'eau de boisson est estimé à partir de l'indice bêta global de l'eau de pluie. L'expérience acquise autour des autres essais permet d'établir la valeur du rapport entre l'activité de l'eau de pluie et l'activité de l'eau de boisson entre 12 et 20. Ce rapport est dû aux phénomènes de décroissance radioactive, de décantation et de filtration. Le 26 septembre, l'indice bêta global de l'eau de boisson est estimé à une valeur comprise entre $1,3.10^3$ et $2,2.10^3 \text{ Bq.l}^{-1}$.



Prélèvement d'eau de coco à Tureia.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DE TUREIA

Les doses estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité sont rassemblées dans le tableau 58. Elles sont présentées par voie d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux. Les points particuliers de l'estimation des doses sont en annotation au tableau.

Tableau 58. Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Rigel à Tureia.

| Doses (mSv) | Enfants de 1 à 2 ans | | Adultes | |
|-------------------------------------|----------------------|------------------|---------------------|------------------|
| | Dose efficace | Dose thyroïde | Dose efficace | Dose thyroïde |
| Inhalation (1) | 0,0026 | 0,03 | 0,002 | 0,015 |
| Exposition externe au panache (1) | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | |
| Exposition externe au dépôt (2) | 0,051 | | 0,051 | |
| Consommation d'eau (3) | 0,05 - 0,08 | 0,52 - 0,88 | 0,01 - 0,02 | 0,12 - 0,2 |
| Consommation de produits marins (4) | 0,0046 - 0,095 | 0,056 - 1,1 | 0,0018 - 0,074 | 0,019 - 0,73 |
| Bilan | 0,1 - 0,2 | 0,6 - 2,0 | 0,06 - 0,1 | 0,2 - 0,9 |

- (1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache sont calculées avec l'hypothèse que la population était à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache et ne disposait d'aucune protection particulière. Ces doses sont calculées sur la base d'un indice bêta global des aérosols atmosphériques déduit de l'indice bêta global de l'eau de pluie mesuré le 26 septembre. Cette estimation de l'activité atmosphérique conduit à une valeur de l'ordre de 400 Bq.m^{-3} , en moyenne, limitée à la durée du passage du nuage.

- (2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations.
- (3) L'indice bêta global de l'eau de boisson étant sous la forme d'un intervalle de valeurs, les doses dues à la consommation d'eau de boisson sont sous la forme d'un intervalle de valeurs dont la valeur maximale correspond à l'indice bêta global maximum de cette eau.
- (4) Les doses dues à la consommation de produits marins sont déduites des rapports établis, à partir des observations de terrain, entre les mesures de l'indice bêta global des dépôts au sol et les doses dues à la consommation de produits de la pêche. Ces rapports varient de $2,2 \cdot 10^{-6}$ à $1,1 \cdot 10^{-7}$ et correspondent respectivement à la dose maximale et minimale

Remarque : La dose due à la consommation de légumes-fruits et de fruits est négligeable et il n'y a pas de production de légumes-feuilles à Tureia.

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires réalisées après l'essai ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 0,06 et 0,15 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 0,10 et 0,23 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 0,2 et 0,9 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 0,6 et 2,0 mSv.

ESSAI ARCTURUS

L'essai Arcturus d'une énergie de 22 kt a été effectué à Mururoa, le 2 juillet 1967, à 7h30, heure locale, sur une barge ancrée dans le lagon. Pendant l'essai, un vent au niveau du sol venait du nord-nord-est, alors que de 5 000 à 9 000 mètres d'altitude, sa direction était de ouest-sudouest avec une vitesse de 15 m.s^{-1} . La vitesse maximale du vent mesurée à 31 m.s^{-1} était observée à 13 000 mètres. Ces conditions météorologiques ont entraîné le nuage radioactif vers l'île de Tureia, à 110 km au nord de Mururoa. Le 4 juillet, entre 16h10 et 19h10, Tureia est atteint par les retombées. Ce même jour, 2,5 mm de pluie sont tombés sur l'atoll. Ces retombées ont été confirmées par les mesures effectuées dans les différentes composantes de l'environnement et de la chaîne alimentaire.

Atmosphère

Un indice bêta global maximum de $9,25 \text{ Bq.m}^{-3}$ a été enregistré à Tureia, accompagné d'un débit de dose $50 \text{ } \mu\text{Gy.h}^{-1}$.

Dépôt au sol

Le 4 juillet, le débit de dose dû aux dépôts a été mesuré entre 3 à $10 \text{ } \mu\text{Gy.h}^{-1}$ ce qui correspondait, à des activités surfaciques calculées comprises entre 1,30 et $4,45 \cdot 10^6 \text{ Bq.m}^{-2}$. Cette dernière valeur correspondait à un dépôt de $1,60 \cdot 10^7 \text{ Bq.m}^{-2}$ le 2 juillet 1967 à la fin des retombées. L'indice bêta global mesuré entre $3,3 \cdot 10^5$ et $35 \cdot 10^5 \text{ Bq.m}^{-2}$ sur des bacs collecteurs des retombées conforte ces estimations. L'indice bêta global de l'eau de pluie collectée le 4 juillet s'élevait à $4,8 \cdot 10^4 \text{ Bq.l}^{-1}$.

Eau de boisson

L'indice bêta global de l'eau de la citerne permettant l'adduction d'eau était de 11 à 74 Bq.l⁻¹ le 4 juillet, avant l'arrivée de la pluie, et de 2 400 Bq.l⁻¹ le 5 juillet.

Végétaux

L'indice bêta global mesuré sur des échantillons de fruits d'arbre à pain (uru) et de papayer était respectivement de $4,72.10^3$ et $4,42.10^3$ Bq.kg⁻¹ frais, le 5 juillet.

Mollusques et crustacés

La valeur maximale de l'indice bêta global de $6,93.10^5$ Bq.kg⁻¹ frais a été mesurée le 5 juillet dans la chair d'un bënëtier prélevé le 3 juillet. L'indice bêta global de la chair d'un turbo prélevée le 11 juillet était de $2,02.10^3$ Bq.kg⁻¹ frais.

Poissons

L'indice bêta global le plus élevé, $1,66.10^4$ Bq.kg⁻¹ frais, a été mesuré dans la chair d'un poisson chirurgical prélevé le 11 juillet. L'indice bêta global de la chair d'un poisson perroquet prélevé le 6 juillet était de $3,08.10^3$ Bq.kg⁻¹ frais, à la date du 11 juillet ; celui d'un mērou prélevé le 3 juillet était de $1,3.10^3$ Bq.kg⁻¹ frais, au 5 juillet.



Prélèvement de végétaux-feuilles à Tureia.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DE TUREIA

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 59).

Tableau 59. Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Arcturus à Tureia.

| Doses (mSv) | Enfants de 1 à 2 ans | | Adultes | |
|-------------------------------------|---|---------------|---|---------------|
| | Dose efficace | Dose thyroïde | Dose efficace | Dose thyroïde |
| Inhalation (1) | 0,019 - 0,11 | 0,23 - 1,38 | 0,012 - 0,07 | 0,1 - 0,63 |
| Exposition externe au panache (1) | 1,7.10 ⁻³ - 9,9.10 ⁻³ | | 1,7.10 ⁻³ - 9,9.10 ⁻³ | |
| Exposition externe au dépôt (2) | 0,7 | | 0,7 | |
| Consommation d'eau (3) | 0,11 | 1,24 | 0,03 | 0,29 |
| Consommation de végétaux (4) | 0,018 - 0,019 | 0,2 - 0,22 | 0,013 - 0,014 | 0,13 - 0,14 |
| Consommation de produits marins (5) | 0,049 - 3,05 | 0,56 - 34,6 | 0,033 - 2,38 | 0,34 - 23,5 |
| <i>Bilan</i> | 0,9 - 4,0 | 2,2 - 37,4 | 0,8 - 3,2 | 0,9 - 24,6 |

- (1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache sont estimées à partir de l'indice bêta global du dépôt ($1,6 \cdot 10^7 \text{ Bq.m}^{-2}$) et de deux vitesses de dépôt, $5 \cdot 10^{-2}$ et $3 \cdot 10^{-1} \text{ ms}^{-1}$. Cet intervalle de valeurs prend en compte les incertitudes sur la granulométrie de l'aérosol atmosphérique composant le nuage radioactif. Les indices bêta global des aérosols atmosphériques sont estimés, selon la vitesse de dépôt, entre $3 \cdot 10^4$ et $5 \cdot 10^3 \text{ Bq.m}^{-3}$, en moyenne, pendant le passage du nuage. La dose maximale correspond à la vitesse de $5 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ et la dose minimale à $3 \cdot 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$. Les doses sont calculées avec l'hypothèse que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache et ne disposaient d'aucune protection particulière.
- (2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations.
- (3) Les doses dues à la consommation d'eau de boisson correspondent à la valeur maximale mesurée. L'activité de l'eau est supposée décroître selon la décroissance radioactive des radionucléides qu'elle contient et dont le spectre est identique à celui de l'aérosol atmosphérique et du dépôt. Les doses sont calculées pour une consommation d'eau d'un mois à partir de l'arrivée du front de retombées. Au-delà, l'activité de l'eau est considérée comme négligeable.
- (4) La dose est due à la consommation de légumes-fruits et de fruits produits localement. Il n'y a pas de production de légumes-feuilles à Tureia.
- (5) La borne supérieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure de l'activité sont plus élevés (poissons chirurgiens et bénitiers) car pêchés dans le lagon. La borne inférieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure sont plus faibles (mérus et turbos) car pêchés en haute mer.

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires disponibles ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 0,8 et 3,2 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 0,9 et 4,0 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 0,9 et 24,6 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 2,2 et 37,4 mSv. La dose de 37,40 mSv délivrée à la thyroïde des enfants est limitée à une population infantine ayant consommé des mollusques, notamment des bénitiers.

ESSAI ENCELADE

L'essai Encelade d'une puissance de 440 kt a été effectué le 12 juin 1971 à 10h15, heure locale, sous ballon sur le site de Mururoa, par 450 mètres d'altitude. Le jour de l'essai, les vents venaient du sud-sud-est, avec une vitesse de 5 m.s^{-1} . En altitude, le régime des vents était mal établi, les vents venaient du sud-ouest, avec une vitesse assez faible, de 10 m.s^{-1} , à 9 000 mètres. Après l'essai, des conditions météorologiques défavorables entraînèrent le nuage radioactif vers l'île de Tureia. Les retombées arrivèrent 8 heures et 50 minutes après l'essai. Le maximum de la retombée a été observé entre 12 heures et 35 minutes et 15 heures et 10 minutes après l'essai. Ces retombées, accompagnées d'une pluie de 10 mm dont la durée a été de 7 heures, ont été confirmées par les mesures effectuées dans l'air, sur le sol et dans les eaux de boisson.

Atmosphère

La valeur maximale de l'indice bêta global, 66 Bq.m^{-3} , a été enregistrée à Tureia, dans l'après midi du 13 juin. Le débit de dose variait entre 30 et $60 \mu\text{Gy.h}^{-1}$.

Dépôt au sol

La valeur maximale de l'indice bêta global du dépôt a atteint $2,2.10^7 \text{ Bq.m}^{-2}$.

Eau de boisson

Les résultats les plus élevés de l'indice bêta global de l'eau de boisson ont été enregistrés pour des échantillons d'eau prélevés dans deux citernes le 13 juin, avec $7,40.10^4$ et $7,03.10^4 \text{ Bq.l}^{-1}$.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DE TUREIA

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 60).



Élevage de porcs chez un particulier.

Tableau 60. Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Encelade à Tureia.

| Doses (mSv) | Enfants de 1 à 2 ans | | Adultes | |
|-------------------------------------|---|-------------------|---|------------------|
| | Dose efficace | Dose thyroïde | Dose efficace | Dose thyroïde |
| Inhalation (1) | 0,01 - 0,062 | 0,14 - 0,82 | 0,004 - 0,024 | 0,04 - 0,25 |
| Exposition externe au panache (1) | 1,3.10 ⁻³ - 8.10 ⁻³ | | 1,3.10 ⁻³ - 8.10 ⁻³ | |
| Exposition externe au dépôt (2) | 1,12 | | 1,12 | |
| Consommation d'eau (3) | 0,25 - 1,8 | 3,023 - 21,12 | 0,06 - 0,45 | 0,66 - 4,7 |
| Consommation de végétaux (4) | 0,008 | 0,04 | 0,0036 | 0,016 |
| Consommation de viande | 0,0014 - 0,0068 | 0,007 - 0,056 | 0,0006 - 0,0028 | 0,0025 - 0,02 |
| Consommation de produits marins (5) | 0,083 - 0,48 | 0,67 - 4,5 | 0,06 - 0,3 | 0,46 - 2,54 |
| Bilan | 1,5 - 3,5 | 3,9 - 26,5 | 1,2 - 1,9 | 1,2 - 7,5 |

- (1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache sont estimées à partir de l'indice bêta global du dépôt ($2,2 \cdot 10^7 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$) et de deux vitesses de dépôt, $5 \cdot 10^{-2}$ et $3 \cdot 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Les indices bêta global des aérosols atmosphériques sont estimés, selon la vitesse de dépôt, entre $5 \cdot 10^4$ et $8 \cdot 10^3 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, en moyenne, durant les 2 heures et 30 minutes du passage du nuage. Cet intervalle de valeurs prend en compte les incertitudes sur la granulométrie de l'aérosol atmosphérique composant le nuage radioactif. La dose maximale correspond à la vitesse de $5 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et la dose minimale à $3 \cdot 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Les doses sont calculées avec l'hypothèse que les populations étaient à l'intérieur des habitations pendant les retombées maximum qui sont arrivées pendant la nuit.
- (2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations.
- (3) Les doses dues à la consommation d'eau de boisson sont sous la forme d'un intervalle de valeurs dont chaque borne correspond à la consommation d'eau de l'une des citernes. L'activité de l'eau est supposée diminuer selon la décroissance radioactive des radionucléides qu'elle contient et dont le spectre est identique à celui de l'aérosol atmosphérique et du dépôt. Les doses sont calculées pour une consommation d'eau d'un mois à partir de l'arrivée du front de retombées. Audelà, l'activité de l'eau est considérée comme négligeable.
- (4) Il n'y a pas de production de légumes-feuilles à Tureia et aucun résultat de mesure ayant porté sur des végétaux, fruits ou viandes n'indique d'activité susceptible d'entraîner des doses supérieures à quelques dizaines de microsieverts.
- (5) La borne supérieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure de l'activité sont plus élevés (poissons perroquets et bénéitiers) car pêchés dans le lagon. La borne inférieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure sont plus faibles (poissons et bénéitiers pêchés sur le récif).

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires disponibles ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 1,3 et 1,9 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 1,5 et 3,5 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 1 et 8 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 4 et 27 mSv. La dose maximale de 27 mSv délivrée à la thyroïde des enfants est limitée à une population infantine ayant bu de l'eau de citerne de collecte des eaux de pluie.

VI.6.6.2 - RETOMBÉES SUR LES ÎLES GAMBIER

Les retombées sur les Îles de l'archipel des Gambier sont consécutives aux essais Aldébaran du 2 juillet 1966, Rigel du 24 septembre 1966 et Phoebé du 8 août 1971.

ESSAI ALDÉBARAN

L'essai Aldébaran, d'une puissance de 28 kt, a été réalisé le 2 juillet 1966, à 5h30, heure locale, sur une barge ancrée dans le lagon de Mururoa. Il a été effectué par un vent d'ouest-nordouest dont la vitesse était de l'ordre de 5 m.s^{-1} au sol et de 20 m.s^{-1} en altitude. Des conditions météorologiques défavorables ont provoqué une inclinaison et un cisaillement du panache, avant sa dispersion dans l'atmosphère. Les vents ont poussé les aérosols et les gaz radioactifs vers l'île inhabitée de Morane, puis vers les Îles Gambier situées à 450 km de Mururoa. Les retombées sont arrivées sur l'archipel des Gambier, le jour de l'essai de 16h20 à 17h40. Ces retombées ont été confirmées par les résultats des mesures effectuées dans les différentes composantes de l'environnement et de la chaîne alimentaire.

Atmosphère

L'air a fait l'objet d'une mesure d'indice bêta global, de l'ordre de 60 Bq.m^{-3} . Le débit de dose maximum enregistré pendant le passage du panache a atteint $250 \text{ } \mu\text{Gy.h}^{-1}$.

Dépôt au sol

Le dépôt maximum à Rikitea, sur l'île de Mangareva, était de $5,9.10^7 \text{ Bq.m}^{-2}$.

Eau de boisson

Quatre mesures de l'indice bêta global des eaux de boisson ont été effectuées : le 6 juillet (3 Bq.l^{-1}), le 8 juillet (814 Bq.l^{-1}), le 9 juillet (592 Bq.l^{-1}) et le 21 juillet (2 Bq.l^{-1}).

Végétaux

Les valeurs maximales de l'indice bêta global maximum de $8.10^5 \text{ Bq.kg}^{-1}$ frais ont été mesurées, le 7 juillet, dans des feuilles de radis et $6,7.10^5 \text{ Bq.kg}^{-1}$ frais le 6 juillet dans une salade.



Mollusques et crustacés

Plusieurs mesures d'indice bêta global ont été effectuées sur des mollusques et crustacés prélevés entre le 4 et le 19 juillet 1966. La valeur la plus élevée a été obtenue lors de la mesure de la chair d'un bénitier ($2,2 \cdot 10^5$ Bq.kg⁻¹), les autres résultats étant beaucoup plus faibles : oursin (1 258 Bq.kg⁻¹, le 4 juillet), turbo (370 Bq.kg⁻¹, le 4 juillet), crabe (555 Bq.kg⁻¹, le 19 juillet).

Poissons

Des mesures de l'indice bêta global sur les poissons ont été effectuées entre les 5 et 13 juillet. Le résultat le plus élevé, 130 Bq.kg⁻¹ frais, a été obtenu sur une bonite pêchée dans le lagon.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DES ÎLES GAMBIE

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 61).

Tableau 61. Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Aldébaran sur les îles Gambier.

| Doses (mSv) | Enfants de 1 à 2 ans | | Adultes | |
|-------------------------------------|----------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Dose efficace | Dose thyroïde | Dose efficace | Dose thyroïde |
| Inhalation (1) | 0,2 - 2,2 | 3 - 30 | 0,12 - 1,2 | 1,3 - 13 |
| Exposition externe au panache (1) | 0,02 - 0,21 | | 0,02 - 0,21 | |
| Exposition externe au dépôt (2) | 2,9 | | 2,9 | |
| Consommation d'eau | 0 - 0,48 | 0 - 6 | 0 - 0,12 | 0 - 1,3 |
| Consommation de végétaux (3) | 0,1 - 1,7 | 1,3 - 19 | 0,09 - 1,4 | 1 - 14 |
| Consommation de produits marins (3) | $1,9 \cdot 10^{-3}$ - 1,88 | 0,022 - 22,8 | $9,5 \cdot 10^{-4}$ - 0,8 | $9,8 \cdot 10^{-3}$ - 8,6 |
| Bilan | 3,2 - 9,4 | 4,3 - 77,8 | 3,1 - 6,6 | 2,3 - 36,9 |

- (1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache sont estimées à partir de l'indice bêta global du dépôt ($5,9 \cdot 10^7 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$) et de deux vitesses de dépôt, 10^{-2} et $10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Les indices bêta global des aérosols atmosphériques sont estimés, selon la vitesse de dépôt, entre $1,2 \cdot 10^5$ et $1,2 \cdot 10^4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, en moyenne, durant les 80 minutes de passage du nuage. Cet intervalle de valeurs prend en compte les incertitudes sur la granulométrie de l'aérosol atmosphérique composant le nuage radioactif. La dose maximale correspond à la vitesse de dépôt de $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et la dose minimale à la vitesse de dépôt de $10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Les doses sont calculées avec l'hypothèse que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache et ne disposaient d'aucune protection particulière.
- (2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations.
- (3) La borne supérieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des végétaux dont les résultats de mesure de l'activité sont plus élevés. La borne inférieure correspond à la consommation des végétaux dont les résultats de mesure sont les plus faibles.

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires disponibles ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 3,1 et 6,6 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 3,2 et 9,4 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 2 et 40 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 4 et 80 mSv. La dose de 80 mSv délivrée à la thyroïde des enfants correspond à la dose maximale en supposant que l'enfant aurait consommé la totalité de sa ration alimentaire en sélectionnant systématiquement les éléments les plus contaminés.

ESSAI RIGEL

L'essai Rigel, d'une puissance de 125 kt, a eu lieu le 24 septembre 1966 à 7h00, heure locale, sur une barge ancrée dans le lagon de Fangataufa. Au moment de l'essai, les sondages météorologiques indiquaient des vents de sud-est, avec une vitesse de $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ entre le sol et 500 mètres d'altitude, des vents variables et faibles entre 600 et 3 000 mètres d'altitude. De 3 000 mètres jusqu'à la stratosphère, les vents venaient de l'ouest, avec une vitesse moyenne de $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, atteignant une vitesse de $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ vers 12 000 mètres d'altitude.

Le front des retombées est arrivé sur les Îles Gambier entre 11 et 14 heures après l'essai. Des précipitations d'une durée de 5 minutes se sont produites 19 heures après l'essai, ainsi que le 26 septembre durant 1 heure (1,3 mm de hauteur de précipitation).

Atmosphère

Un indice bêta global moyen de l'air, sur 24 heures, de $3,7 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ a été mesuré au PCR de Mangareva. L'eau de pluie mesurée à ce même poste indiquait un indice bêta global de $1,1 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$.



Prélèvement de végétaux-feuilles sur le Mont Duff aux îles Gambier.

Dépôt au sol

Le dépôt a été estimé à partir de l'activité de l'air, associée à une vitesse de dépôt de 10^{-1} m.s^{-1} et du dépôt humide calculé à partir de l'activité de l'eau de pluie et des quantités tombées. Ainsi, le 26 septembre, après les pluies, l'indice bêta global du dépôt était de l'ordre de $1,75.10^5 \text{ Bq.m}^{-2}$, à Mangareva.

Eau de boisson

L'activité de l'eau de boisson a été établie à partir de l'activité de l'eau de pluie. L'expérience acquise autour d'autres essais a permis d'établir la valeur du rapport entre l'indice bêta global de l'eau de pluie et l'indice bêta global de l'eau de boisson entre 12 et 20. L'indice bêta global de l'eau de boisson le 26 septembre peut donc être estimé entre $9,2.10^3$ et $5,5.10^3 \text{ Bq.l}^{-1}$.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DES ÎLES GAMBIER

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 62).

Tableau 62. Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Rigel sur les îles Gambier.

| Doses (mSv) | Enfants de 1 à 2 ans | | Adultes | |
|-------------------------------------|----------------------|------------------|---------------------|------------------|
| | Dose efficace | Dose thyroïde | Dose efficace | Dose thyroïde |
| Inhalation (1) | $9,4 \cdot 10^{-4}$ | 0,011 | $7,1 \cdot 10^{-4}$ | 0,0052 |
| Exposition externe au panache (1) | $4,7 \cdot 10^{-5}$ | | $4,7 \cdot 10^{-5}$ | |
| Exposition externe au dépôt (2) | 0,019 | | 0,019 | |
| Consommation d'eau (3) | 0,38 - 0,64 | 4,4 - 7,3 | 0,1 - 0,17 | 1 - 1,7 |
| Consommation de végétaux (4) | 0,013 | 0,13 | 0,012 | 0,1 |
| Consommation de produits marins (5) | 0,0016 - 0,033 | 0,02 - 0,38 | 0,00064 - 0,026 | 0,0067 - 0,26 |
| <i>Bilan</i> | <i>0,4 - 0,7</i> | <i>4,6 - 7,8</i> | <i>0,1 - 0,2</i> | <i>1,1 - 2,1</i> |

- (1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache sont calculées avec l'hypothèse que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache et ne disposaient d'aucune protection particulière. Ces doses sont estimées à partir de l'indice bêta global du dépôt ($1,75 \cdot 10^5 \text{ Bq.m}^{-2}$) et d'une vitesse de dépôt de 10^{-1} m.s^{-1} . Les indices bêta global des aérosols atmosphériques sont estimés à 160 Bq.m^{-3} , en moyenne, pendant la durée de passage du nuage sur les Îles Gambier.
- (2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations.
- (3) L'activité de l'eau de boisson étant sous la forme d'un intervalle de valeurs, les doses dues à la consommation d'eau de boisson sont sous la forme d'un intervalle de valeurs dont la valeur maximum correspond à l'activité maximum de cette eau.
- (4) L'indice bêta global des légumes-feuilles est établi à partir du dépôt, sur la base d'un rendement de 1 kg.m^{-2} et d'un rapport de captation de 0,1 qui amène l'indice bêta global des légumes-feuilles à $1,75 \cdot 10^4 \text{ Bq.kg}^{-1}$.
- (5) Les doses dues à la consommation de produits marins sont déduites des rapports établis, à partir des observations de terrain, entre les mesures de l'indice bêta global des dépôts au sol et les doses dues à la consommation de produits de la pêche. Ces rapports varient de $2,2 \cdot 10^{-6}$ à $1,1 \cdot 10^{-7}$ et correspondent respectivement aux doses maximale et minimale.

Les calculs ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 0,1 et 0,23 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 0,4 et 0,7 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 1,1 et 2,1 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 4,6 et 7,8 mSv.

Les doses maximales (efficaces et à la thyroïde) pour les adultes et les enfants sont principalement dues à la consommation d'eau de boisson.

ESSAI PHOEBÉ

L'essai Phoebé, d'une puissance de 4 kt, a été réalisé sous ballon par 230 mètres d'altitude sur la site de Mururoa, le 8 août 1971 à 9h30, heure locale. Au moment de l'essai, la nébulosité était importante et les vents modérés, avec une visibilité supérieure à 15 km. Au sol, les vents venaient du sud-est avec une vitesse de l'ordre de 5 m.s⁻¹. Au-delà de 1 500 mètres d'altitude, les vents venaient de l'ouest et leur vitesse variait de 20 à 25 m.s⁻¹. Après l'essai, des conditions météorologiques défavorables ont entraîné le nuage radioactif vers les Îles Gambier situées à 450 km de Mururoa. Les populations de Rikitea et Taku sont restées dans les abris de prévoyance pendant 17 heures, de 4h30 à 21h30 après l'essai. Les retombées arrivèrent sur les Îles Gambier 6h10 après l'essai, accompagnées d'une pluie qui a duré 30 minutes.

Atmosphère

Une retombée a été constatée aux Îles Gambier, entre 6h10 et 6h40 après l'essai. Le débit de dose maximal a été mesuré à 50 µGy.h⁻¹ pendant une brève période. L'indice bêta global de l'air a atteint un maximum de 6 Bq.m⁻³ à Totegegie, 6h30 après l'essai, avec un débit de dose associé de 14 µGy.h⁻¹.

Dépôt au sol

Un indice bêta global de 5,18 10⁻⁶ Bq.m⁻² a été mesuré sur un dépôt prélevé à Totegegie, 6 heures et 30 minutes après l'essai.

Eau de boisson

L'activité de l'eau distribuée par le système d'adduction à Rikitea, principal village des Îles Gambier, ainsi que celle de l'eau distribuée à partir de la citerne de Taku, petit village de quelques dizaines d'habitants, ont fait l'objet de contrôles réguliers (Tableaux 63 et 64).



Tableau 63. Activité volumique en ^{131}I (Bq.l^{-1}) de l'eau de boisson prélevée à Taku.

| Date de prélèvement | Points de prélèvements | | | | | | | |
|---------------------|------------------------|-----|-------|-----|----|-----|-----|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 10/08/1971 | - | - | - | - | - | - | - | 2 300 |
| 15/08/1971 | 454 | 736 | 1 190 | 248 | 7 | 287 | 693 | 1 252 |
| 17/08/1971 | 115 | 185 | 405 | 123 | 28 | 279 | 83 | 11 |
| 24/08/1971 | < LD | 120 | 80 | 4 | 38 | 10 | 260 | < LD |
| 31/08/1971 | < LD | 67 | < LD | 3 | 14 | 86 | 132 | 2 |

Tableau 64. Activité volumique en ^{131}I (Bq.l^{-1}) de l'eau de boisson prélevée à Rikitea.

| Date de prélèvement | Points de prélèvements | |
|---------------------|------------------------|---------|
| | Source | Robinet |
| 10/08/1971 | 1,37 | 0,8 |
| 17/08/1971 | 2 | 90 |
| 24/08/1971 | 12 | 15 |

Végétaux

Les légumes-feuilles ont fait l'objet de contrôles réguliers. L'indice bêta global le plus élevé, $4,5 \cdot 10^5 \text{ Bq.kg}^{-1}$, a été mesuré le 12 août dans des prélèvements de salade non lavés.

Mollusques

Un indice bêta global de 950 Bq.kg^{-1} , dont 183 Bq.kg^{-1} de ^{131}I , a été mesuré le 25 août dans un bénitier prélevé le 11 août. Ceci correspond à un indice bêta global égal à $1,73 \cdot 10^4 \text{ Bq.kg}^{-1}$, dont 615 Bq.kg^{-1} en ^{131}I à la date du prélèvement. Une activité de $55,8 \text{ Bq.kg}^{-1}$ de ^{131}I a été mesurée le 25 août dans un turbo prélevé le 11 août, ce qui correspond à une activité de 188 Bq.kg^{-1} en ^{131}I à la date du prélèvement.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DES ÎLES GAMBIE

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 65).

Tableau 65. Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Phoebé sur les îles Gambier.

| Doses (mSv) | Enfants de 1 à 2 ans | | Adultes | |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | Dose efficace | Dose thyroïde | Dose efficace | Dose thyroïde |
| Inhalation (1) | 0,00076 - 0,0031 | 0,0096 - 0,039 | 0,00053 - 0,0021 | 0,0042 - 0,017 |
| Exposition externe au panache (1) | 0,00052 - 0,002 | | 0,00052 - 0,002 | |
| Exposition externe au dépôt (2) | 0,11 | | 0,11 | |
| Consommation d'eau (3) | 0,37 - 7 | 4,3 - 88,2 | 0,1 - 1,8 | 1 - 19,4 |
| Consommation de végétaux (4) | 0,028 - 0,72 | 0,34 - 9 | 0,025 - 0,64 | 0,27 - 7,1 |
| Consommation de produits marins (5) | 0,015 - 0,048 | 0,18 - 0,58 | 0,0058 - 0,019 | 0,06 - 0,2 |
| <i>Bilan</i> | <i>0,5 - 7,9</i> | <i>4,8 - 97,8</i> | <i>0,2 - 2,6</i> | <i>1,3 - 26,7</i> |

- (1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe due au panache sont calculées pour une activité des aérosols atmosphériques estimée à partir des dépôts ($5,18.10^6 \text{ Bq.m}^{-2}$). Pour tenir compte des incertitudes sur la granulométrie des aérosols atmosphériques, un intervalle de vitesse de dépôts compris entre $5.10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ et $2.10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$ a été retenu.
L'indice bêta global des aérosols atmosphériques est estimé, selon la vitesse de dépôt, entre $5,7.10^4$ et $1,5.10^4 \text{ Bq.m}^{-3}$, en moyenne, pendant les trente minutes du passage du nuage sur les Îles Gambier.
Les doses sont calculées dans une fourchette correspondant à l'intervalle des vitesses de dépôt. Les doses dues à l'inhalation sont calculées avec un facteur de protection égal à 0,1 car les populations étaient à l'intérieur des abris de prévoyance pendant le passage du nuage. Les doses dues à l'exposition externe résultant du passage du nuage sont calculées avec un facteur de protection égal à 0,5.
- (2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations. Les populations ayant séjourné durant les 24 premières heures dans les abris de prévoyance, la dose durant cette période a été considérée comme nulle.
- (3) La valeur maximale correspond à la dose reçue par un habitant de Taku et la valeur minimale à celle reçue par un habitant de Rikitea.
- (4) La borne supérieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des végétaux dont les résultats de mesure de l'activité sont plus élevés. La borne inférieure correspond à la consommation des végétaux dont les résultats de mesure sont les plus faibles.
- (5) La borne supérieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure de l'activité sont plus élevés (bénitier) car présentant des facteurs de reconcentration plus élevés (mollusques filtreurs) la borne inférieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure de l'activité sont moins élevés (turbo) car présentant des facteurs de reconcentration plus faibles (mollusques brouteurs).

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires disponibles ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 0,2 et 2,6 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 0,5 et 7,9 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 1,3 et 26,7 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 4,8 et 98 mSv. La dose de 98 mSv délivrée à la thyroïde des enfants correspond à une population enfantine ayant consommé des denrées produites localement parmi les plus contaminées. La principale contribution aux doses efficaces et à la thyroïde est la consommation d'eau. Les doses maximales sont obtenues à Taku (île de Mangareva) et correspondent à la consommation des eaux du puits communal.

Autres essais ayant contribué plus faiblement aux retombées sur les Îles Gambier :

Eridan (1970)

Une retombée directe est détectée aux îles Gambier le 25 juin à 01 h00. Le débit de dose maximal de $0,95 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ était atteint le 25 juin à 12h30. L'activité volumique moyenne de l'air le 25 juin était de $5,5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

Toucan (1970)

Des retombées directes ont été détectées aux îles Gambier, le 7 août, à 14h00. Le maximum a été atteint le 8 août, entre 1h00 et 3h00, avec $0,84 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$. L'activité volumique atmosphérique moyenne sur 24 heures était de $0,55 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ avec, pendant une heure, un pic à $3,5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

VI.6.6.3 - RETOMBÉES SUR L'ÎLE DE TAHITI

ESSAI CENTAURE

L'essai Centaure, d'une puissance de 4 kt, a été réalisé sous ballon, par 270 mètres d'altitude, sur le site de Mururoa, le 17 juillet 1974 à 8h00, heure locale. Il a été effectué sur la limite Nord d'une cellule anticyclonique en voie d'affaiblissement centrée sur l'atoll de Morane ; avec des vents de basse couche venant du sud-est, d'une vitesse de l'ordre de $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ tendant à faiblir dans la journée du 17 juillet. Dix minutes après l'essai, la tête du nuage s'est détachée du pied et a culminé à 5 200 mètres, une altitude plus basse que les estimations prévues. Le nuage principal a généré plusieurs nuages secondaires qui ont suivi des trajectoires distinctes, dirigées vers l'ouest. Ces conditions météorologiques ont entraîné le nuage radioactif vers l'île de Tahiti. Les retombées ont abordé Tahiti le 19 juillet par la côte Est.

Des précipitations (1,4 mm) liées aux effets du relief ont bloqué les nuages au-dessus de Tahiti, entraînant des dépôts au sol hétérogènes. D'Arue à Papara, sur la côte Ouest qui est la plus peuplée, le niveau de la retombée a été dix fois plus faible que sur la côte Est et la presque île, où il a été sensiblement plus élevé. Compte tenu des temps de transport des aérosols jusqu'à Tahiti, les radionucléides prépondérants étaient les ^{239}Np , ^{105}Rh , ^{133}I , ^{132}I et ^{131}I , représentant respectivement 12,2%, 7,6%, 7%, 5,2% et 2% de l'activité.

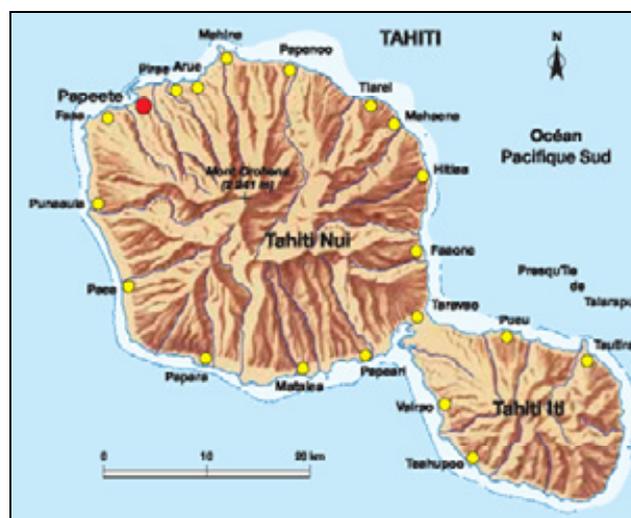


Tableau 66. Activités volumiques (Bq.m⁻³) des radionucléides émetteurs gamma présents sur les deux filtres prélevés à Mahina le 19 juillet 1974.

| Radionucléides | Filtre 1 (629 Bq.m ⁻³) | Filtre 2 (1 180 Bq.m ⁻³) |
|-----------------------|---------------------------------------|---|
| ⁹⁵ Zr | 3 | 8 |
| ⁹⁵ Nb | 0,1 | 0,35 |
| ⁹⁷ Zr | 23 | 54 |
| ⁹⁷ Nb | 25 | 58 |
| ⁹⁹ Mo | 36 | 130 |
| ^{99m} Te | 39 | 142 |
| ¹⁰³ Ru | 4 | 11 |
| ¹³¹ I | 12 | 37 |
| ¹³² Te | 21 | 60 |
| ¹³² I | 22 | 62 |
| ¹³³ I | 15 | 43 |
| ¹³⁶ Cs | 0,4 | 1,62 |
| ¹³⁷ Cs | - | 0,05 |
| ¹⁴⁰ Ba | 10 | 37 |
| ¹⁴⁰ La | 7 | 24 |
| ¹⁴¹ Ce | - | 11 |
| ¹⁴³ Ce | 24 | 91 |
| ²³⁹ Np | 83 | 278 |
| ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | - | 0,07 |

Atm osphère

À Tahiti, le 19 juillet, l'indice alpha global de l'atmosphère était de 0,044 Bq.m⁻³, dont 70% de ²³⁹Pu, et l'indice bêta global était de 740 Bq.m⁻³, dont 1% dû aux iodures radioactifs ; les activités volumiques étant de l'ordre du Bq.m⁻³ pour les ⁸⁹Sr et ⁹⁰Sr.

À Mahina, les indices bêta global moyens sur 24 heures, mesurés sur deux filtres positionnés le 19 juillet, étaient de 629 et 1 180 Bq.m⁻³. Les filtres ont également fait l'objet d'une spectrométrie gamma directe (Tableau 66).

Dépôt au sol

Les mesures effectuées ont montré une grande hétérogénéité des dépôts sur les zones côtières (Fig. 159). Compte tenu de cette hétérogénéité, différentes estimations de dose ont été effectuées, considérant toutes les populations concernées de Tahiti.

Ces estimations de dose ont été faites pour :

- Hitiaa, où l'activité du dépôt a été trois fois plus élevée ($7,5 \cdot 10^6$ Bq.m⁻²) que celle mesurée à Mahina ($2,5 \cdot 10^6$ Bq.m⁻²) ;
- Pirae, où l'activité du dépôt était égale à $3,3 \cdot 10^5$ Bq.m⁻² ;
- le sud de Teahupoo et le plateau de Taravao, où les activités des dépôts ont été maximales, $2,75 \cdot 10^7$ Bq.m⁻², du fait des précipitations plus importantes dans ces deux régions.

Eaux de boisson

L'indice bêta global et l'activité des radionucléides émetteurs gamma présents dans l'eau de boisson ont été suivis au cours du temps, à Hitiaa, (Tableau 67) ainsi qu'à Pirae et Teahupoo pour l'indice bêta global (Tableau 68). La valeur la plus élevée de l'indice bêta global, 7 000 Bq.l⁻¹, a été atteinte le 19 juillet, à Hitiaa.

Tableau 67. Activités volumiques (Bq.l⁻¹) des radionucléides mesurés par spectrométrie gamma dans l'eau de boisson prélevée à Hitiaa, du 19 juillet au 1er août 1974.

| Date | Activité β global | ¹³¹ I | ¹³² I | ¹³³ I | ¹⁴⁰ Ba-La | ¹⁰³ Ru | ⁹⁵ Zr |
|-------|-------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|-------------------|------------------|
| 19/07 | 7 061 | 88 | 600 | 230 | 44 | 34 | 7 |
| 20/07 | 2 717 | 48 | 47 | 26 | 17 | | |
| 21/07 | 602 | 12 | 27 | 19 | 4 | | |
| 22/07 | 403 | | | | | | |
| 23/07 | 281 | 5 | 21 | 7 | 1 | | |
| 24/07 | 1 320 | 35 | 109 | 45 | 139 | | |
| 25/07 | 512 | 6 | 15 | 6 | | | |
| 26/07 | 140 | 4 | 3 | 4 | | | |
| 27/07 | 48 | 4 | | 5 | | | |
| 28/07 | 150 | | | | | | |
| 29/07 | 30 | 1 | | | | | |
| 30/07 | 100 | 1 | | | | | |
| 31/07 | 8 | | | | | | |
| 01/08 | 44 | | | | | | |

Tableau 68. Activités volumiques (Bq.l⁻¹) des radionucléides mesurés par spectrométrie gamma dans l'eau de boisson prélevée à Pirae et à Teahupoo, du 19 juillet au 1er août 1974.

| Date | Activité β global Pirae | Activité β global Teahupoo |
|-------|-------------------------|----------------------------|
| 19/07 | 733 | 941 |
| 20/07 | 463 | 144 |
| 21/07 | 302 | 261 |
| 22/07 | 142 | 275 |
| 23/07 | 104 | 140 |
| 24/07 | 221 | 47 |
| 25/07 | 223 | 51 |
| 26/07 | 221 | 88 |
| 27/07 | 60 | 93 |
| 28/07 | 47 | 48 |
| 29/07 | 34 | 4 |
| 30/07 | 23 | 11 |
| 31/07 | 24 | 47 |
| 01/08 | 40 | 8 |



Vaches dans les paturages de Tahiti.

Lait de vache

En 1973, le lait produit à Tahiti représentait 20% de la consommation totale. Il provenait du plateau de Taravao, pour 800 000 litres, et des régions de Mataiea et Atimaono, pour 300 000 litres. Ce lait servait à la production de produits dérivés (yaourts, glaces, fromages) et de lait pasteurisé. Une partie de ce lait n'était donc pas habituellement consommé immédiatement après sa production.

D'autres élevages, comportant au total 92 vaches laitières, ont produit un lait dont la consommation locale a été immédiate. L'activité volumique du lait, en particulier celle de ^{131}I , produit par l'un de ces élevages, à Hitiaa, a été suivie journalièrement entre le 19 juillet et le 16 septembre 1974 (Fig. 187). Ces données complètent celles obtenues pour le lait commercialisé au marché de Papeete (Fig. 168).

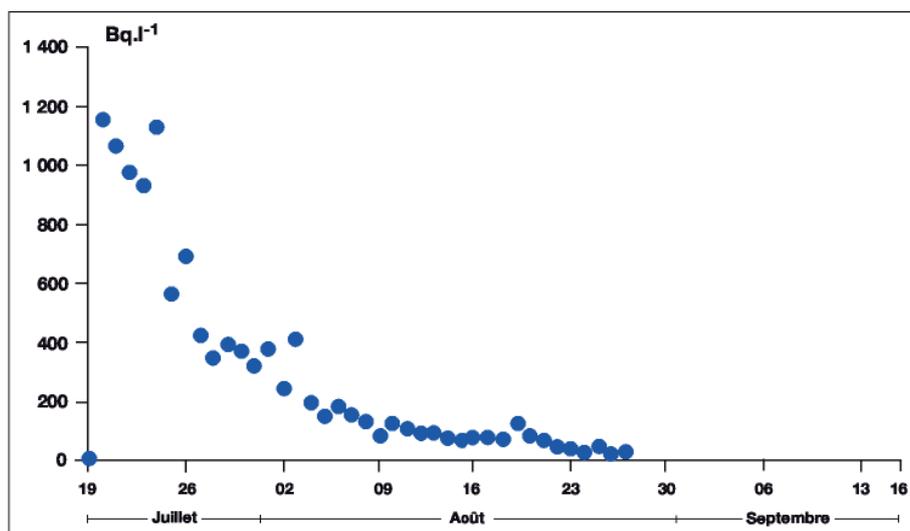


FIG. 187. Activité volumique (Bq.l⁻¹) de ^{131}I dans le lait produit à Hitiaa, entre le 19 juillet et le 16 septembre 1974.

Légumes

Les mesures réalisées sur les végétaux ont porté sur de nombreuses variétés de la production locale : salades, choux chinois, fafa (variété d'épinard), poireaux, etc. Les valeurs maximales de l'indice bêta global ont été mesurées, le 19 juillet 1974, dans le fafa: 410 000 Bq.kg⁻¹ frais, dont 8 000 Bq.kg⁻¹ frais pour ¹³¹I, 13 000 Bq.kg⁻¹ frais pour ¹³²I, 11 000 Bq.kg⁻¹ frais pour ¹³³I et 10 000 Bq.kg⁻¹ frais pour ¹⁴⁰La. À Teahupoo, le 19 juillet, l'activité dans le fafa était de 2 070 Bq.kg⁻¹ frais, pour ¹⁴⁰La, et 4 290 Bq.kg⁻¹ frais, pour ¹³¹I. L'activité mesurée dans les salades était beaucoup plus faible, inférieure à 100 Bq.kg⁻¹ frais.

Viandes et produits animaux

Compte tenu des transferts et des courtes périodes radioactives des radionucléides prépondérants, les niveaux d'activité des viandes étaient faibles. L'indice bêta global des œufs de poules prélevés à Mahina était de 6 500 Bq.kg⁻¹ frais, le 26 juillet. À Hitiaa, l'indice bêta global des œufs prélevés était mesuré à 4 660 Bq.kg⁻¹ frais, le 26 juillet.

Produits de la mer

Les niveaux d'activité des produits de mer ont été faibles, compte tenu des transferts et des courtes périodes radioactives des principaux radionucléides. Par exemple, l'activité due à l'iode-131 a atteint 13 Bq.kg⁻¹ dans un rouget et 8 Bq.kg⁻¹ dans la chair d'un bénéitier. L'activité maximum due à l'iode-131 a été de 32 Bq.kg⁻¹ dans un ature, le 14 août 1974.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DES POPULATIONS DE TAHITI

L'hétérogénéité des dépôts au sol et le contraste entre les habitudes alimentaires des populations urbaines et celles des populations rurales de l'île nécessitent de faire des estimations de dose différentes, tenant compte de ces facteurs. Trois estimations de dose ont été faites :

- La première pour Pirae dont les sols ont été épargnés par les pluies pendant les retombées et dont les habitants ont des habitudes de vie urbaines.
- La deuxième pour Hitiaa où des pluies ont accru les retombées et dont les habitants ont des habitudes de vie rurales.
- Enfin, la troisième estimation de dose concerne deux zones de l'île de Tahiti ayant des caractéristiques communes: le plateau de Taravao et la région de Teahupoo. En effet, toutes deux ont fait l'objet de dépôts pluvieux et abritent des activités d'élevage, avec une présence réduite de travailleurs agricoles.

Ces trois zones ont des profils démographiques très différents. La zone de Pirae, comme celle de Papeete regroupe la plus grande part des habitants de l'île, alors que la zone d'Hitiaa regroupe quelques milliers d'habitants. Les zones de Taravao et Teahupoo sont fréquentées par quelques centaines de personnes.

Estimation de l'exposition de la population de Pirae

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte: inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 69).

Tableau 69. Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Centaure sur Tahiti à Pirae.

| Doses (mSv) | Enfants de 1 à 2 ans | | Adultes | |
|-------------------------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Dose efficace | Dose thyroïde | Dose efficace | Dose thyroïde |
| Inhalation (1) | 0,05 | 0,57 | 0,046 | 0,27 |
| Exposition externe au panache (1) | 0,002 | | 0,002 | |
| Exposition externe au dépôt (2) | 0,053 | | 0,053 | |
| Consommation de lait (3) | 0,36 | 4,5 | 0,03 | 0,4 |
| Consommation d'eau (4) | 0,05 | 0,6 | 0,016 | 0,2 |
| Consommation d'œuf et de viande | 0,095 | 1,28 | 0,046 | 0,57 |
| Consommation de végétaux (5) | 0,35 | 4,3 | 0,15 | 1,7 |
| Consommation de produits marins (6) | 0,23 | 2,86 | 0,11 | 1,22 |
| <i>Bilan</i> | <i>1,2</i> | <i>14,1</i> | <i>0,5</i> | <i>4,4</i> |

- (1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache ont été calculées sur la base d'une activité des aérosols atmosphériques estimée à partir du dépôt ($3,3 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$) et pour une vitesse de dépôt de $5 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, correspondant à une situation de temps sec. L'indice bêta global des aérosols atmosphériques est estimé à $1 \text{ 500 Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, en moyenne, durant le passage du nuage sur Tahiti, soit douze heures et trente minutes. Cette dose est estimée en supposant que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache.
- (2) Les doses dues à l'exposition externe au dépôt sont estimées pour une présence de six mois, en supposant que les populations étaient à l'extérieur des habitations les deux tiers du temps. L'indice bêta global retenu pour le dépôt est $3,3 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$.
- (3) La consommation de lait a été estimée à un demi-litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et à 30 cl par jour, pour les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 26 août, date à partir de laquelle l'activité du lait a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.
- (4) La consommation quotidienne d'eau a été supposée de 1 litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 2,7 litres, pour les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 1er août, date à partir de laquelle l'activité de l'eau a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.
- (5) La dose a été calculée pour une consommation quotidienne de 30 grammes de végétaux, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 100 grammes, pour les adultes, pendant une période de 6 mois.
- (6) Les doses ont été calculées pour une consommation quotidienne de 100 grammes de poisson et 15 grammes de mollusques et crustacés, pour les enfants de 1 à 2 ans et de 370 grammes de poisson et 50 grammes de mollusques et crustacés, pour les adultes, pendant une période de 6 mois.

Estimation des doses pour les populations de Hitiaa

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 70).

Tableau 70. Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Centaure sur Tahiti à Hitiaa.

| Doses (mSv) | Enfants de 1 à 2 ans | | Adultes | |
|--------------------------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Dose efficace | Dose thyroïde | Dose efficace | Dose thyroïde |
| Inhalation (1) | 0,57 | 6,4 | 0,52 | 3,1 |
| Exposition externe au panache (1) | 0,025 | | 0,025 | |
| Exposition externe au dépôt (2) | 1,2 | | 1,2 | |
| Consommation de lait (3) | 2,1 | 25 | 0,2 | 1,7 |
| Consommation d'eau (4) | 0,1 | 1,3 | 0,03 | 0,3 |
| Consommation d'œuf et de viande | 0,051 | 0,68 | 0,0246 | 0,25 |
| Consommation de végétaux (5) | 0,95 | 11,9 | 0,41 | 4,5 |
| Consommations de produits marins (6) | 0,274 | 3,4 | 0,177 | 1,96 |
| <i>Bilan</i> | 5,3 | 48,7 | 2,6 | 11,8 |

- (1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache ont été calculées à partir d'une activité des aérosols atmosphériques estimée à partir du dépôt ($7,5 \cdot 10^6$ Bq.m⁻²) et pour une vitesse de dépôt de 10^{-2} m.s⁻¹, correspondant à une situation de temps pluvieux. L'indice bêta global des aérosols atmosphériques est estimé à $16\ 500$ Bq.m⁻³, en moyenne, durant le passage du nuage sur Tahiti, soit douze heures et trente minutes. Cette dose est estimée en supposant que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache.
- (2) Les doses dues à l'exposition externe au dépôt sont estimées pour une présence de six mois, en supposant que les populations étaient à l'extérieur des habitations les deux tiers du temps. L'indice bêta global retenu pour le dépôt est $7,5 \cdot 10^6$ Bq.m⁻².
- (3) La consommation de lait a été estimée à un demi-litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et à 30 cl par jour, pour les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 26 août, date à partir de laquelle l'activité du lait a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.
- (4) La consommation quotidienne d'eau a été supposée d'un demi-litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 1 litre pour, les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 1er août, date à partir de laquelle l'activité du lait a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.
- (5) La dose a été calculée pour une consommation quotidienne de 30 grammes de végétaux, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 100 grammes, pour les adultes, pendant une période de 6 mois.
- (6) Les doses ont été calculées pour une consommation quotidienne de 100 grammes de poisson et 35 grammes de mollusques et crustacés, pour les enfants de 1 à 2 ans. Les doses ont été calculées pour une consommation quotidienne de 470 grammes de poisson et 210 grammes de mollusques et crustacés, pour les adultes, pendant une période de 6 mois.

Estimation de l'exposition des populations de Teahupoo et Taravao

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 71).

Tableau 71. Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Centaure sur Tahiti à Teahupoo et Taravao.

| Doses (mSv) | Enfants de 1 à 2 ans | | Adultes | |
|-------------------------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Dose efficace | Dose thyroïde | Dose efficace | Dose thyroïde |
| Inhalation (1) | 2,1 | 24,2 | 1,9 | 11 |
| Exposition externe au panache (1) | 0,09 | | 0,09 | |
| Exposition externe au dépôt (2) | 1,1 | | 1,1 | |
| Consommation de lait (3) | 0,36 | 4,5 | 0,03 | 0,4 |
| Consommation d'eau (4) | 0,018 | 0,22 | 0,0045 | 0,05 |
| Consommation d'œuf et de viande | 0,0461 | 0,61 | 0,025 | 0,23 |
| Consommation de végétaux (5) | 0,56 | 6,9 | 0,225 | 2,6 |
| Consommation de produits marins (6) | 0,274 | 3,4 | 0,177 | 1,96 |
| Bilan | 4,5 | 39,8 | 3,6 | 16,2 |

- (1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache ont été calculées à partir d'une activité des aérosols atmosphériques estimée à partir du dépôt ($2,7 \cdot 10^7$ Bq.m⁻²) et pour une vitesse de dépôt de 10^{-2} m.s⁻¹, correspondant à une situation de temps pluvieux. L'indice bêta global des aérosols atmosphériques est estimé à 60 000 Bq.m⁻³, en moyenne, durant le passage du nuage sur Tahiti, soit douze heures et trente minutes. Cette dose est estimée en supposant que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache.
- (2) Les doses dues à l'exposition externe au dépôt sont estimées pour une présence de six mois, en supposant que les personnes ayant des activités dans ces zones y étaient présentes durant 4 heures par jour. L'indice bêta global retenu pour le dépôt est de $2,75 \cdot 10^7$ Bq.m⁻².
- (3) La consommation de lait a été estimée à un demi-litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et à 30 cl par jour, pour les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 26 août, date à partir de laquelle l'activité du lait a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.
- (4) La consommation quotidienne d'eau a été supposée d'un demi litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 1 litre, pour les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 1er août, date à partir de laquelle l'activité du lait a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.
- (5) La dose a été calculée pour une consommation quotidienne de 30 grammes de végétaux, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 100 grammes, pour les adultes, pendant une période de 6 mois.
- (6) Les doses ont été calculées pour une consommation quotidienne de 100 grammes de poisson et 35 grammes de mollusques et crustacés, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 470 grammes de poisson et 210 grammes de mollusques et crustacés, pour les adultes, pour une période de six mois.

La dose efficace maximale délivrée à un enfant de 1 à 2 ans, tranche d'âge présentant les doses les plus élevées, vivant à Hitiaa, a été de l'ordre de 5 mSv, en 1974. La contribution de la dose due à la consommation de lait représente 60% de la dose efficace par ingestion et 40% de la dose efficace totale.

La dose efficace maximale pour un enfant de 1 à 2 ans ayant séjourné à Taravao ou à Teahupoo pendant le passage du nuage, puis durant quatre heures par jour, est de l'ordre de 4,5 mSv en 1974. Dans ce cas, la dose efficace est due pour près de 50% à l'inhalation et pour près de 25% à l'exposition au dépôt.

La dose efficace pour un enfant vivant à Pirae ou à Papeete, dans des conditions de vie urbaines, est de l'ordre de 1 mSv. Elle est due, pour un tiers, à la consommation de lait et pour un tiers de végétaux.

La dose efficace maximale pour un adulte ayant séjourné à Taravao ou à Teahupoo, pendant le passage du nuage, puis durant quatre heures par jour, est de l'ordre de 3,6 mSv. L'inhalation contribue à plus de 50% à cette dose.

À Pirae, la dose efficace maximale pour un adulte est de 0,5 mSv, due, pour plus de 30%, à la consommation de végétaux. À Hitiaa, la dose efficace maximale pour un adulte, due, pour près de 50%, à l'exposition au dépôt, est de 2,6 mSv.

En 1974, une dose à la thyroïde, de l'ordre de 50 mSv, a pu être délivrée aux enfants âgés de 1 à 2 ans vivant à Hitiaa qui auraient consommé du lait produit localement.

Pour un adulte présent à Taravao ou à Teahupoo pendant le passage du nuage, puis durant quatre heures par jour, la dose à la thyroïde serait de l'ordre de 16 mSv et pour un enfant, la dose à la thyroïde serait de l'ordre de 40 mSv, pour plus de 60% à cause de l'inhalation des isotopes de l'iode.

À Pirae, les doses à la thyroïde sont dues pour 30% à la consommation de lait et de végétaux pour les enfants de 1 à 2 ans, et pour 40 % à la consommation de végétaux pour les adultes.

À Hitiaa, une dose de l'ordre de 12 mSv a pu être délivrée à la thyroïde des adultes, essentiellement à cause de la consommation de végétaux (40%) et à l'inhalation d'iode pendant le passage du panache (25%).

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires disponibles ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 0,5 et 3,6 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 1,2 et 5,3 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 4,4 et 16,2 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 14,1 et 48,7 mSv.

VI.6.6.4 - BILAN GLOBAL DES DOSES

Les expositions maximales de la population vivant en Polynésie française sont celles calculées pour les personnes résidant sur les îles de Tureia et de Tahiti, ainsi que dans l'archipel des Gambier (Tableau 72). Pour chaque essai indiqué, la dose efficace à l'adulte calculée après l'essai par le SMSR est indiquée dans la colonne 4. Les nouvelles estimations de dose effectuées en 2006 par le CEA pour les essais prépondérants, Aldébaran, Rigel, Arcturus, Encelade, Phoebé et Centaure, figurent en colonnes 5 à 8. Elles recourent celles réalisées par le SMSR.

Les doses efficaces aux adultes dues aux retombées associées à cinq autres expérimentations : Umbriel, Toucan, Dragon, Rigel et Éridan ont également été estimées après essai.

Tableau 72. Bilan des doses reçues par les populations des îles et atolls les plus exposés pour les essais dont les retombées ont été les plus importantes.

| Lieu | Essai | Année | Estimation SMSR | | Estimation CEA 2006 (mSv) | | |
|-------------|-----------|-------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| | | | Dose efficace adulte (mSv) | Dose efficace enfant de 1 à 2 ans | Dose thyroïde enfant de 1 à 2 ans | Dose efficace adulte | Dose thyroïde adulte |
| Gambier | Aldébaran | 1966 | 5,5 | 3 à 10 | 4 à 78 | 3 à 7 | 2 à 40 |
| | Rigel | 1966 | | 0,4 à 0,71 | 4,6 à 7,8 | 0,1 à 0,23 | 1,1 à 2,1 |
| | Éridan | 1970 | 0,1 | | | | |
| | Toucan | 1970 | 0,2 | | | | |
| | Phoebé | 1971 | 1,2 | 0,5 à 7,9 | 4,8 à 98 | 0,2 à 2,6 | 1,3 à 26,7 |
| Tureia | Rigel | 1966 | | 0,1 à 0,23 | 0,6 à 2 | 0,06 à 0,15 | 0,15 à 1 |
| | Arcturus | 1967 | 1 | 0,9 à 4 | 2 à 38 | 0,79 à 3,2 | 0,9 à 25 |
| | Dragon | 1970 | 0,16 | | | | |
| | Encelade | 1971 | 1,3 | 1,5 à 3,5 | 4 à 27 | 1,3 à 1,9 | 1 à 8 |
| Reao | Toucan | 1970 | 0,15 | | | | |
| Hereheretue | Umbriel | 1972 | 0,2 | | | | |
| Tahiti : | | | | | | | |
| Pirae | Centaure | 1974 | 0,8 | 1,2 | 14 | 0,5 | 4 |
| Hitiaa | Centaure | 1974 | | 5,3 | 49 | 2,6 | 12 |
| Teahupoo | Centaure | 1974 | | 4,5 | 40 | 3,6 | 16 |

VI.6.6.5 – SUIVI RADIOLOGIQUE DES POPULATIONS

Dans le cadre de la surveillance radiologique de la population résidant en Polynésie, 25 campagnes de mesures anthropogammamétriques sur les populations des îles les plus proches des sites d'expérimentations ont eu lieu, entre 1966 et 1974 (Tableau 73).

La première campagne de mesures anthropogammamétriques des Îles Gambier, effectuée entre le 7 et le 16 juillet 1966, a porté sur 5 personnes résidant à Mangareva pendant le passage du nuage dû à l'essai Aldébaran. Les résultats des anthropogammamétries font apparaître une exposition interne par les radionucléides à vie courte, sans pour autant entraîner des doses efficaces supérieures à quelques centaines de microsievverts et des doses à la thyroïde supérieures à quelques millisievverts. Du 10 au 20 août 1966, une campagne de contrôle de la population a porté sur 223 personnes résidant dans l'archipel des Gambier. Les résultats de cette campagne effectuée un peu plus d'un mois après l'essai Aldébaran ont mis en évidence une très faible exposition interne pour 17 personnes et l'absence d'exposition interne pour les 206 autres. Deux autres campagnes, menées à Tureia du 4 au 13 juillet puis du 4 au 5 août 1967, à la suite de l'essai Arcturus ont mis en évidence que 14 et 28 personnes respectivement avaient un indice de tri supérieur à 5.

Tableau 73. Résultats des campagnes de mesures anthropogammamétriques réalisées, entre 1966 et 1974, sur les populations les plus proches des sites d'expérimentations.

| Année | Lieu | Date | Nombre de contrôles en fonction de l'indice de tri | | |
|-------|-----------|------------------|--|-----------|-----|
| | | | ≤ 2 | > 2 à ≤ 5 | > 5 |
| 1966 | GAMBIER | 7 au 16 juillet | | | 5 |
| | GAMBIER | 10 au 20 août | 206 | 17 | |
| | HAO | 5 au 8 octobre | 76 | 32 | |
| | TUREIA | 12 novembre | 60 | | |
| | GAMBIER | 6 au 12 décembre | 307 | 3 | |
| 1967 | PUKARUA | 19 au 20 avril | 93 | | |
| | REAO | 21 au 22 avril | 124 | 2 | |
| | HAO | 15 au 30 juin | 70 | | |
| | TUREIA | 4 au 13 juillet | | | 14 |
| | REAO | 13 juillet | 6 | | |
| | PUKARUA | 18 juillet | 6 | | |
| | TUREIA | 4 au 5 août | 25 | | 28 |
| 1968 | PUKARUA | 2 et 3 avril | 16 | 46 | |
| | TUREIA | 5 au 11 avril | 15 | 30 | 1 |
| | REAO | 17 avril | 22 | 44 | |
| | VAIRAATEA | avril | 5 | 7 | |
| | HIKUERU | avril | 12 | | |
| | ANAA | avril | 19 | | |
| | GAMBIER | 19 au 22 juin | 51 | | |
| 1970 | TUREIA | 21 octobre | 47 | | |
| 1971 | TUREIA | 16 au 19 avril | 49 | | |
| | TUREIA | 1 au 6 septembre | 53 | | |
| 1972 | TUREIA | 8 et 9 mai | 50 | | |
| 1973 | TUREIA | 18 et 19 avril | 59 | | |
| 1974 | TUREIA | 29 au 31 mai | 52 | | |

D'autres campagnes de mesures réalisées en 1968, plusieurs mois après la fin de la campagne 1967, ont mis en évidence un nombre significatif de contaminations associées à des doses de l'ordre de quelques centaines de microsieverts.

VI.6.6.6 - ÉVALUATION RADIOLOGIQUE DES ESSAIS SOUTERRAINS

Lors des essais souterrains, des barrières physiques ont été mises en place sur les câbles de liaison entre le conteneur et la surface associées à des dispositifs destinés à améliorer l'étanchéité des circuits pendant les phases de post-forage.

Lors des essais sous la couronne, des débits de doses significatifs étaient mesurés au niveau des dispositifs de prélèvement de gaz (cf. Chapitre II). Les doses reçues par les opérateurs, à une exception près, étaient inférieures à 0,5 mSv. Aucune exposition du personnel, présent à distance, sous le vent, n'a été mesurée.

Lors des essais réalisés sous lagon, en l'absence de risques d'exposition les dernières années, les missions de récupération des enregistrements s'effectuaient, sans tenues ni équipements

particuliers ; elles restaient cependant encadrées par du personnel de radioprotection et disposaient de moyens de surveillance dosimétrique.

Au cours de certaines opérations de post-forage, quelques cas de contamination cutanée du personnel ont été constatés. Les activités atmosphériques en ^{131}I sur le chantier n'ont pas dépassé quelques Bq.m^{-3} (cf. Chapitre II).

VI.7 - CONCLUSION

Durant toute la période d'exploitation du CEP, les efforts déployés par les expérimentateurs pour réduire autant que techniquement possible les risques d'exposition du personnel ou des populations ont été particulièrement importants et soutenus. C'est à la suite des essais atmosphériques que les doses les plus élevées ont été délivrées à quelques membres du personnel, en particulier lors des opérations de pénétrations pilotées dans le nuage radioactif, ainsi qu'aux populations des Gambier, de Tureia et de Tahiti, principalement par les retombées proches de six essais.

Le bilan de la surveillance de l'exposition externe des travailleurs du CEP montre que seule une infime partie du personnel, qui faisait l'objet d'une surveillance dosimétrique rigoureuse, a été exposée à des doses mensuelles supérieures au seuil d'enregistrement de 0,2 mSv. Près de 91 % du résultat des mesures des dosimètres présentaient une dose nulle et seulement 3 doses ont été supérieures à 50 mSv.

Les 250 000 examens anthropogammamétriques et radiotoxicologiques effectués sur le personnel pendant la période des essais n'ont révélé qu'un nombre limité de cas de contamination qui n'ont conduit qu'à de faibles ou très faibles doses.

Les doses susceptibles d'être délivrées aux populations de trois îles de Polynésie par les retombées radioactives proches des six essais : Aldébaran en juillet 1966, Rigel en septembre 1966, Arcturus en juillet 1967, Encelade en juin 1971, Phoebé en août 1971 et Centaure en juillet 1974 ont été réévaluées en 2005-2006. Les activités de l'ensemble des radionucléides rejetés dans l'atmosphère par ces essais ont été estimées en prenant en compte les caractéristiques de chaque engin testé : puissance, matières nucléaires et matériaux utilisés. Les résultats des mesures de radioactivité effectuées dans l'environnement et les produits alimentaires des îles touchées par les retombées ont également été utilisés pour évaluer l'exposition des populations.

Ces expositions ont été estimées sous la forme d'intervalles de doses afin de tenir compte des incertitudes sur les conditions environnementales au moment des retombées et de la variabilité, parfois grande, des résultats de mesure en particulier sur les produits de la chaîne alimentaire. Les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle correspondent respectivement aux résultats de mesure d'activité les plus bas et les plus hauts obtenus sur les échantillons de l'environnement, en particulier au niveau des dépôts.

L'estimation des doses efficaces maximales pour les enfants a conduit à une valeur de 10 mSv, c'est-à-dire un niveau de dose qualifié de faible, pour lequel aucun effet stochastique n'est attendu. Celle des doses maximales à la thyroïde des enfants a atteint des valeurs de plusieurs dizaines de millisieverts : 78 mSv après l'essai Aldébaran aux Gambier en 1966, 98 mSv aux Gambier après l'essai Phoebé en 1971 et environ 50 mSv à Tahiti après l'essai Centaure en 1974.

Cependant, l'évaluation de ces doses est volontairement surestimée par la méthode de calcul utilisée et les valeurs des paramètres retenues en 2006. Les maxima doivent donc être considérés comme des valeurs qui ne pouvaient être qu'exceptionnellement atteintes. D'ailleurs, les résultats de mesures anthropogammamétriques effectuées à l'époque des essais, réexaminés aujourd'hui, ne confirment pas des niveaux d'exposition aussi élevés. Enfin, l'état actuel des connaissances et les données acquises, notamment lors de l'utilisation médicale d'iode radioactif pour des diagnostics de la thyroïde ou après les études épidémiologiques consécutives aux retombées radioactives de l'essai Bravo réalisé en 1954 par les États-Unis aux îles Marshall, montrent que ces niveaux de dose ne devraient pas conduire à l'apparition d'un nombre décelable de cancers de la thyroïde en excès dans les populations vivant en Polynésie.

VI.8 - BIBLIOGRAPHIE

COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE (1984).- Publications 40, Vol 14 n°2.

COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE. – Publications 66.

COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE (1995). - Publication 71 «age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides : Part 4, Inhalation dose coefficients, Vol 25 n°3-4.

COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE (1996). - Publication 72 «age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides : Part 5, compilation of ingestion and inhalation dose coefficients, Vol. 26 n° 1.

DIRECTIVE EUROPÉENNE 96/29. - Euratom du conseil du 13 mai 1996 «fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants».

GROUZELLE C., DOMINIQUE M., LAFAY F., DUCOUSSO R. (1985). - Résultats d'une enquête alimentaire effectuée à TAHITI de 1980 à 1982. Rapport CEA-R-5304.

KABIS de SAINT-CHAMAS L., BABLET J.P., ARNOULD C., DUCOUSSO (1991). - Evolution de la teneur en césium¹³⁷ depuis 1967 dans l'eau de coco et le coprah en Polynésie française. Radioprotection, GEDIM 1991, Vol 26 (1) 75-80.

LEDERMANN S. (1965). - Niveaux de contamination radioactive du milieu ambiant et de la chaîne alimentaire. Contamination radioactive des denrées alimentaires – Détermination des niveaux admissibles. Association EURATOM – CEA Rapport CEA-R-2707

MECHALI, DOUSSET, PARDO et PENOT (1 966). - Dose délivrée à la thyroïde produits de fission. Health Physisc, 12 15-27.

UNITED NATIONS (1958). - Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Official Records of the General Assembly, Thirteenth Session, Supplement No. 17 (A/3838). New York.

UNITED NATIONS (1972). - Ionizing Radiation: Levels and Effects. Volume I: Levels, Volume II: Effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York.

UNITED NATIONS (1977). - Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York.

UNITED NATIONS (1982). - Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York.

UNITED NATIONS (1988). - Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York.

UNITED NATIONS (1993). - Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York.

UNITED NATIONS (2000). - Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York.

U.S. Environmental Protection Agency, Federal Guidance report 12, External exposure to radionuclides in air, water and soil. EPA-402-R93-081.

I.3. Calcul de l'impact dosimétrique des retombées de l'essai 'Arcturus' à Tureia (Dossier d'Etude Technique, CEA-DAM)

I - INTRODUCTION

L'objet de ce document est d'évaluer l'impact dosimétrique, sur la population de Tureia, des retombées de l'essai atmosphérique ARCTURUS, réalisé le 2 juillet 1967.

Toutes les voies d'atteinte sont considérées : l'inhalation (doses efficaces et doses à la thyroïde), l'irradiation externe (doses efficaces par le panache et les dépôts), l'ingestion (doses efficaces et doses à la thyroïde).

II - CONTEXTE

L'essai ARCTURUS, d'une énergie de 22 kt, a été réalisé à partir d'une barge mouillée en lagon.

Cet essai a eu lieu le 2 juillet 1967, à 17h30 TU (07h30 W), à partir de la zone Denise de Mururoa. Les coordonnées géographiques du point "zéro" sont 21°47'11" Sud et 139°53'33" W, c'est-à-dire à 700 m du Poste Enregistrement Avancé (PEA) Denise ; l'altitude du tir était de 3 m.

III - METHODOLOGIE DE CALCUL

III.1 - METHODE DE CALCUL

Pour évaluer l'impact des retombées de cet essai, on dispose de mesures d'activités, exprimées en β global, notamment dans des aliments et de l'eau prélevée dans les citernes de Tureia. Cet atoll est situé à environ 120 km au nord-ouest de Mururoa. Le panache y est arrivé environ 8h40 après l'essai. La retombée radioactive s'est poursuivie jusqu'à H+11h40 après l'essai.

Il faut noter que, dans ce document, les calculs d'impact à long terme, prenant en compte la remise en suspension, ne sont pas réalisés.

Les dépôts mesurés et les données dans les échantillons disponibles ont servi aux calculs de doses efficaces par irradiation externe, inhalation et ingestion.

Comme les résultats de mesures sont exprimés en β global, la répartition des radionucléides dans le dépôt ou dans les échantillons prélevés est déduite du terme source calculé par le CEA/DAM, en prenant en compte la décroissance radioactive et les filiations de chaque radionucléide du terme source et en supposant que le transport atmosphérique n'a provoqué aucune discrimination physico-chimique entre les radionucléides.

L'activité de chaque radionucléide dans les différents milieux est calculée au cours du temps à l'aide des données de la base JEFF, version 3.1. Sur les 1300 isotopes présents initialement dans le terme source, environ 1000 sont des isotopes radioactifs. Après 11h40 de décroissance, délai correspondant à la fin de la retombée à Tureia, 70 isotopes contribuent majoritairement à l'activité globale. La liste de ces isotopes majoritaires en termes d'activité dans le dépôt et dans l'air à Tureia figure dans le Tableau 17 en annexe.

Une répartition des radionucléides dans les différents milieux peut ainsi être prise en compte à partir des calculs de terme source effectués par le CEA/DAM. Faute d'informations sur les

transferts des radionucléides vers la chaîne alimentaire, on suppose que la répartition calculée à partir du terme source est valable dans les échantillons.

Par la suite, pour chaque isotope présent sous forme d'aérosol dans le panache, l'activité volumique intégrée sur le temps de la retombée, exprimée en Bq.s.m^{-3} , est déduite du dépôt au sol, exprimé en Bq.m^{-2} , à partir de la vitesse de dépôt V_d , en m.s^{-1} .

$$\text{Act vol intégrée} = \frac{\text{Dépôt}}{V_d}$$

Pour évaluer les activités volumiques intégrées sur le temps de passage du panache des radionucléides sous forme d'aérosols dans l'air, on a considéré deux valeurs possibles de vitesse de dépôt : $5 \cdot 10^{-2}$ et $3 \cdot 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$. En effet, compte tenu de la répartition en taille des aérosols formés lors d'un essai nucléaire, les vitesses de dépôt de ceux-ci se situent majoritairement entre ces valeurs car le panache radioactif est arrivé rapidement à Tureia (moins d'une journée après l'essai).

L'activité des gaz rares, qui sert uniquement au calcul de la dose par irradiation externe par le panache, est déduite de l'activité des aérosols à l'aide des ratios de leurs activités respectives par rapport à l'activité totale dans le panache à l'instant de calcul considéré.

III.1.1 - DOSES PAR INHALATION

La dose par inhalation due à l'ensemble des isotopes, exprimée en Sv, est égale à la somme des produits de l'activité volumique intégrée sur le temps de passage du panache pour chaque isotope par le débit respiratoire QR_j , exprimé en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, fonction de l'âge de la personne, et du coefficient de dose, soit efficace, soit à la thyroïde, $CD_{\text{inhal } i,j}$, qui s'exprime en Sv.Bq^{-1} inhalé, et est fonction de l'isotope et de sa forme physico-chimique ainsi que de l'âge de la personne :

$$\text{Dose inhal} = \sum_i (\text{Act vol intégrée}_i \times QR_j \times CD_{\text{inhal } i,j})$$

Les gaz rares ne contribuent pas à la dose par inhalation.

Pour les calculs de doses internes, différentes classes d'âge ont été retenues, du bébé à l'adulte.

Les résultats sont exprimés en termes de dose efficace, due à l'ensemble des isotopes du terme source, ainsi que de dose à la thyroïde, essentiellement due aux iodes et, en moindre part, aux tellures.

Les retombées à Tureia s'étant produites en fin d'après-midi, la dose par inhalation, efficace ou à la thyroïde, est calculée en supposant que l'individu exposé se trouve à l'extérieur de son habitation pendant le passage du panache.

III.1.2 - DOSES EFFICACES PAR IRRADIATION EXTERNE

Ces doses sont identiques quel que soit l'âge de l'individu.

III.1.2.1 - IRRADIATION EXTERNE PAR LE PANACHE

La dose efficace due à l'irradiation externe par le panache, exprimée en Sv, est égale à la somme des produits de l'activité volumique intégrée de chaque isotope présent dans le panache, par le coefficient de dose efficace pour la voie "irradiation externe par le panache", CD_{pch_i} , qui s'exprime en $Sv/(Bq.s.m^{-3})$ et est fonction de l'isotope :

$$\text{Dose externe panache} = \sum_i (\text{Act vol intégrée}_i * CD_{pch_i})$$

Pour les aérosols, l'activité volumique intégrée sur le temps de passage du panache est identique à celle utilisée pour le calcul de la dose par inhalation. Comme indiqué précédemment, les rapports entre les activités des gaz rares et celles des autres isotopes du terme source sont identiques à ceux calculés à partir de l'évolution dans le temps du terme source.

III.1.2.2 - IRRADIATION EXTERNE PAR LES DEPOTS

Connaissant les activités déposées pour les différents isotopes, on peut en déduire, dans un premier temps, le débit de dose dû au dépôt. Celui-ci, exprimé en $Sv.h^{-1}$, est égal à la somme des produits du dépôt par isotope par le coefficient de dose efficace, pour la voie "irradiation externe par le dépôt", $CD_{dépôt_i}$, qui s'exprime en $(Sv.h^{-1})/(Bq.m^{-2})$, et est fonction de l'isotope :

$$\text{Débit de dose externe dépôt} = \sum_i (\text{Dépôt}_i \times CD_{dépôt_i})$$

Puis, par intégration pour différentes durées d'exposition, on évalue la dose due au dépôt, en prenant en compte la décroissance radioactive de l'isotope, caractérisé par sa constante radioactive λ_{rad_i} . Cette dose évolue au cours du temps, selon la durée de présence T de l'individu considéré sur le dépôt. Cette dose perdue au-delà du passage du panache.

$$\text{Dose externe dépôt} = \sum_i \left(\frac{\text{Débit de dose dépôt}_i [1 - \exp(-\lambda_{rad_i} T)]}{\lambda_{rad_i}} \right)$$

Dans le calcul de la dose intégrée due au dépôt, on considère un coefficient d'atténuation, prenant en compte le fait que les individus concernés passent une partie du temps à l'intérieur des habitations et se déplacent. Ils sont présents les 2/3 du temps sur le dépôt.

III.1.3 - DOSES PAR INGESTION

Cette dose est due à la consommation d'aliments produits localement, contaminés par les retombées radioactives. Cette dose est fonction de l'âge de l'individu ; elle dépend donc de sa consommation.

Comme pour les doses par inhalation, les résultats sont exprimés en termes de dose efficace, due à l'ensemble des isotopes du terme source, ainsi que de dose à la thyroïde, essentiellement due aux iodes et, en moindre part, aux tellures.

Les calculs de dose par ingestion se font à partir des activités, exprimées en β global, effectivement mesurées dans les aliments d'origine locale. La répartition des activités des isotopes dans les différents aliments à la date considérée est supposée identique à la

répartition des activités dans le dépôt, calculée à partir de l'évolution dans le temps du terme source.

Lorsqu'on connaît l'activité par isotope dans l'aliment consommé, exprimée en Bq.kg^{-1} , la dose par ingestion se calcule par la somme, sur les différents isotopes, des produits de l'activité en Bq.kg^{-1} , par la consommation, en kg et le coefficient de dose par ingestion, $\text{CD}_{\text{ing } i,j}$, soit efficace, soit à la thyroïde, qui s'exprime en Sv par Bq ingéré :

$$\text{Dose ingestion} = \sum_i (\text{Act aliment }_i \times \text{conso }_j \times \text{CD ingestion }_{i,j})$$

III.2 - ORIGINE DES DONNEES

III.2.1 - COEFFICIENTS DE DOSE

III.2.1.1 - DOSES EFFICACES INTERNES

Pour le calcul des doses efficaces internes, par inhalation et par ingestion, les coefficients de dose proviennent de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003. Ils sont rappelés dans le Tableau 21 et le Tableau 22.

Dans le cas des doses par inhalation, la forme physico-chimique associée aux différents isotopes est celle recommandée, soit par ce même arrêté, soit par la Directive Européenne, soit par la CIPR 71-72. En ce qui concerne les doses à la thyroïde, les coefficients de dose proviennent de la CIPR 71-72. Pour la voie inhalation, les coefficients de dose correspondent à une granulométrie des aérosols de 1 μm , valeur habituellement utilisée pour les calculs de dose au public.

Pour la voie inhalation, l'iode est supposé émis sous forme vapeur.

Les coefficients de dose à la thyroïde figurent dans le Tableau 23 et le Tableau 24.

Les débits respiratoires sont ceux indiqués dans la CIPR-66.

Tableau 1: Débits respiratoires utilisés pour les différentes classes d'âge ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$).

| Classe d'âge | Bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Débit respiratoire ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) | $3,31. 10^{-5}$ | $5,97. 10^{-5}$ | $1,01. 10^{-4}$ | $1,77. 10^{-4}$ | $2,33. 10^{-4}$ | $2,57. 10^{-4}$ |

III.2.1.2 - DOSES EFFICACES EXTERNES

Pour la voie irradiation externe par le panache et les dépôts, les coefficients de dose proviennent du rapport Federal Guidance n°12. Les coefficients de dose due au dépôt sont rappelés dans le Tableau 21.

Dans les calculs de dose due aux dépôts présentés dans cette étude, on suppose que les personnes passent 2/3 de leur temps à l'extérieur sur les dépôts. Cette hypothèse est conservative, notamment sur des longues périodes.

Tableau 2: Rations alimentaires d'origine locale considérées dans cette étude (g.j⁻¹).

| Catégorie | Aliment | Turcia | |
|---------------------------------|--------------------------------------|-------------|---------------|
| | | Quantité | |
| | | par aliment | par catégorie |
| boisson | eau | 1000 | |
| | eau de citerne | | |
| | eau de coco lait | 2000 | |
| poissons | thon | | 470 |
| | bonite ature inaa | | |
| | poissons haute mer poissons lagon | 30 440 | |
| viandes | poulet | 10 | 30 |
| | porc | 10 | |
| | bœuf | | |
| | chien | 10 | |
| mollusques | turbo | 60 | 190 |
| | bénitier | 100 | |
| | poulpe | 30 | |
| | autres mollusques | | |
| crustacés | chevrettes | | 20 |
| | langouste | 20 | |
| coprah | | 220 | 220 |
| fruits plantes arborescentes | banane | 50 | 170 |
| | papaye | 60 | |
| | citron | | |
| | mangue | | |
| | avocat | | |
| | pamplemousse | | |
| | uru autres fruits | 60 | |
| fruits plantes herbacées | ananas | | |
| | tomates | | |
| | concombre aubergine | | |
| | autres fruits | | |
| légumes feuilles | salade | | |
| | chou | | |
| | poireau | | |
| | fafa | | |
| | autres légumes | | |
| racines et tubercules | taro | | |
| | patate douce | | |
| | tarua | | |
| | navet | | |
| | carotte | | |
| | manioc | | |
| | autres | | |
| | total origine locale | | 1100 |

III.2.2 - RATION ALIMENTAIRE

Une enquête sur l'alimentation des familles de Tureia indique que, en 1967, la population de Tureia était composée de 58 personnes, dont 15 enfants.

Il apparaît que l'alimentation est variable quantitativement dans une même famille, mais non qualitativement. De plus, il y a peu de différence d'une famille à l'autre. Les bébés (au nombre de 2 en août 1967) consommaient essentiellement du lait concentré.

Dans les documents de base, la ration alimentaire n'est disponible que pour des adultes. Pour les autres classes d'âge, on a évalué une consommation fonction de l'âge, qui est indiquée dans les différents tableaux présentant les résultats des doses.

IV - DONNEES METEOROLOGIQUES

Pendant l'essai ARCTURUS, le vent venait du nord-nord-est au niveau du sol et de l'ouest-sud-ouest, entre les hauteurs de 5000 et 9000 m, où sa vitesse était de 15 m.s^{-1} dans la direction 250° .

La vitesse maximale du vent, observée à 13000 m, était de 31 m.s^{-1} ; sa direction était de 260° .

Le 4 juillet, c'est-à-dire 2 jours après l'essai, il a plu à Tureia ; l'intensité relevée était de 2,5 mm.

V - TERME SOURCE

V.1 - ACTIVITES EMISES

A l'instant initial, l'activité totale est due à des isotopes tels que ^{97}Sr , ^{96}Sr , ^{89}Y , ^{103}Nb , ^{99}Zr , ^{95}Rb , ^{102}Nb ..., isotopes de périodes très courtes (inférieures à quelques secondes) et qui ne sont plus présents dans le panache lors de son arrivée à Tureia.

V.2 - ISOTOPES PREPONDERANTS LORS DE L'ARRIVEE A TUREIA

Le terme source calculé par le CEA/DAM a été exploité à l'aide de la version 3.1 de la base de données JEFF, afin de connaître l'évolution de la répartition en isotopes à différents instants, notamment à H + 8h40, temps d'arrivée du panache à Tureia.

A la fin de la retombée à Tureia (H + 11h40), les isotopes majoritaires en termes d'activité sont ^{239}Np , ^{135}Xe , ^{135}I , ^{133}I ... qui correspondent chacun à plus de 5% de l'activité globale (cf. Tableau 17).

VI - BILAN DES MESURES DANS L'ENVIRONNEMENT

VI.1 - MESURES "PHYSIQUES"

A Tureia, la retombée a été observée de H+8h40 environ à H+11h40 ; elle a duré 3 heures. Le maximum de cette retombée a été observé vers H+10h00.

Le débit de dose associé variait de 30 à $50 \mu\text{Gy.h}^{-1}$ (3 à 5 mrad.h^{-1}). Dans le document de base, il est indiqué que la valeur maximale est probablement surestimée.

VI.1.1 - ACTIVITES DANS L'AIR

On dispose de mesures de l'activité sur filtres APA après l'essai ARCTURUS (cf. Tableau 18) ; ces mesures ne sont citées ici qu'à titre indicatif ; elles ne sont pas utilisées dans les calculs d'impact ultérieurs car il s'agit de valeurs instantanées, insuffisantes pour le calcul de la dose par irradiation externe par le panache et de la dose interne par inhalation.

A Tureia, l'activité maximale de l'air mesurée avec un MAC-TROP était de $9,25 \text{ Bq.m}^{-3}$ (250 pCi.m^{-3}) le 2 juillet 1967. L'activité de l'air prélevé par trompe Bertin était inférieure à $0,37 \text{ Bq.m}^{-3}$ (10 pCi.m^{-3}).

VI.1.2 - DEPOTS

A Tureia, des mesures de débits de dose dus aux dépôts réalisées le 4 juillet, c'est-à-dire 2 jours après l'essai, indiquent des valeurs de 3 à $10 \mu\text{Gy.h}^{-1}$ ($0,3$ à 1 mrad.h^{-1}), respectivement dans le village et la zone "nord" pour la valeur la plus basse et dans la zone "est" pour la valeur la plus élevée. Ces mesures correspondent à des dépôts **calculés** variant de 1,3 à $4,45 \cdot 10^6 \text{ Bq.m}^{-2}$ ($3,5 \cdot 10^{-9}$ à $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ci.cm}^{-2}$), deux jours après l'essai.

Des prélèvements sur bacs à résine indiquaient un dépôt de $3,3 \cdot 10^5$ à $3,5 \cdot 10^6 \text{ Bq.m}^{-2}$ ($9 \cdot 10^{-6}$ à $9,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ci.m}^{-2}$), cohérentes avec une valeur mesurée au CAB/TROP au même endroit, qui est de $3,5 \cdot 10^6 \text{ Bq.m}^{-2}$ ($9,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ci.m}^{-2}$). Aucune contamination par des émetteurs α n'a été détectée. La date de ces mesures n'étant pas connue, les valeurs obtenues sur les bacs à résine ne seront pas utilisées par la suite.

VI.1.3 - EAUX

Le 5 juillet, l'activité maximale de l'eau de la citerne du village était de 2400 Bq.l^{-1} ($6,45 \cdot 10^4 \text{ pCi.l}^{-1}$). D'autres mesures indiquent des valeurs plus faibles, de 11 à 74 Bq.l^{-1} le 4 juillet, a priori avant l'arrivée de la pluie qui a contaminé les citernes par ruissellement.

A titre indicatif, l'activité moyenne dans de l'eau de pluie collectée le 4 juillet est de $4,8 \cdot 10^4 \text{ Bq.l}^{-1}$ (1300 pCi.cm^{-3}).

VI.2 - MESURES DANS LES MILIEUX BIOLOGIQUES

Les mesures dans les milieux biologiques sont limitées. Les données initiales sont exprimées en activité γ et le rapport β / γ est de 1,3. Les valeurs indiquées dans le Tableau 20 en annexe sont exprimées en activité β totale, après multiplication de l'activité γ par 1,3.

Aucune mesure d'activité dans de la viande n'est disponible.

VI.2.1 - VEGETAUX

Quelques mesures dans de l'uru (fruit de l'arbre à pain) et de la papaye sont disponibles (cf. Tableau 20).

Le 5 juillet, l'activité β globale maximale dans de l'uru prélevé le 3 juillet est de $4,72 \cdot 10^3 \text{ Bq.kg}^{-1}$.

Le 5 juillet, l'activité β globale maximale dans une papaye prélevée le 3 juillet est de $4,42 \cdot 10^3 \text{ Bq.kg}^{-1}$.

VI.2.2 - MOLLUSQUES ET CRUSTACES

L'activité β globale maximale dans de la chair de bénitier (tridacne) prélevé le 3 juillet est de $6,93 \cdot 10^5 \text{ Bq.kg}^{-1}$ le 5 juillet.

Dans un turbo prélevé le 11 juillet, l'activité β globale est de $2,02 \cdot 10^3 \text{ Bq.kg}^{-1}$ le 18 juillet. Il s'agit de la seule mesure disponible.

VI.2.3 - POISSONS

Les différents résultats présentés dans le Tableau 20 montrent une variation importante des activités selon les espèces de poissons.

L'activité maximale a été déterminée dans un acanthuridae (poisson chirurgien).

L'activité β globale la plus élevée a été obtenue le 18 juillet dans un poisson chirurgien prélevé le 11 juillet. Cette activité est de $1,66 \cdot 10^4 \text{ Bq.kg}^{-1}$ le 18 juillet. Ce prélèvement et cette mesure sont relativement tardifs et plus élevés que les autres mesures disponibles. Elle sera cependant prise en compte dans les calculs, au même titre que toutes les autres mesures disponibles, présentées dans le Tableau 20.

Le 5 juillet, l'activité β globale maximale dans un mulot prélevé le 3 juillet est de $5,58 \cdot 10^3 \text{ Bq.kg}^{-1}$.

L'activité β globale maximale mesurée le 11 juillet dans un poisson perroquet prélevé le 6 juillet est de $3,08 \cdot 10^3 \text{ Bq.kg}^{-1}$.

L'activité β globale maximale mesurée dans le mérout prélevé le 3 juillet est de $1,3 \cdot 10^3 \text{ Bq.kg}^{-1}$ le 5 juillet.

Remarque : Sur l'ensemble des milieux biologiques, ce sont dans les bénitiers que les activités mesurées sont les plus fortes.

VII - CALCULS DE DOSES

La répartition initiale des activités des isotopes dans le dépôt, utilisée par la suite dans les calculs de dose par inhalation et par irradiation externe, est calculée en utilisant une décroissance pendant 11h40, heure de fin de retombée à Tureia.

VII.1 - DOSES PAR INHALATION

L'activité dans l'air des différents isotopes est estimée en prenant en compte deux vitesses de dépôt :

- une vitesse de dépôt de $5 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$, conduisant aux activités dans l'air les plus élevées, et une évaluation maximale de la dose due à l'irradiation externe par le panache et de la dose par inhalation,
- une vitesse de dépôt assez élevée, $3 \cdot 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$, valeur proposée historiquement pour des retombées proches.

L'activité volumique dans l'air, intégrée sur le temps de la retombée, est déduite de la valeur de dépôt la plus élevée estimée à Tureia, à savoir $4,45 \cdot 10^6 \text{ Bq.m}^{-2}$ deux jours après l'essai,

soit $1,6 \cdot 10^7 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ à H+11h40, heure de fin de retombée. Cette valeur a été utilisée car, bien qu'il s'agisse d'une mesure déduite du débit de dose due au dépôt, elle apparaît comme étant la plus fiable ; en effet, les mesures sur les bacs à résine ne sont pas datées.

Les débits respiratoires sont les débits présentés dans le Table 1. Ils sont rappelés dans les tableaux de résultats ci-dessous.

VII.1.1 - DOSE EFFICACE PAR INHALATION

Tableau 3: Dose efficace par inhalation pour différentes classes d'âge (mSv).

| Classe d'âge | | Bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|---|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Débit respiratoire ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) | | $3,31 \cdot 10^{-5}$ | $5,97 \cdot 10^{-5}$ | $1,01 \cdot 10^{-4}$ | $1,77 \cdot 10^{-4}$ | $2,33 \cdot 10^{-4}$ | $2,57 \cdot 10^{-4}$ |
| Vitesse de dépôt ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | $5 \cdot 10^{-2}$ | 0,08 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,09 | 0,07 |
| | $3 \cdot 10^{-1}$ | $1,3 \cdot 10^{-2}$ | $1,9 \cdot 10^{-2}$ | $1,7 \cdot 10^{-2}$ | $1,6 \cdot 10^{-2}$ | $1,5 \cdot 10^{-2}$ | $1,2 \cdot 10^{-2}$ |

La dose efficace la plus élevée, 0,11 mSv, est calculée pour un enfant âgé de 1 à 2 ans en prenant en compte la vitesse de dépôt de $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, qui conduit à l'activité volumique intégrée sur le temps de la retombée la plus importante.

VII.1.2 - DOSE A LA THYROÏDE PAR INHALATION

Tableau 4: Dose à la thyroïde par inhalation pour différentes classes d'âge (mSv).

| Classe d'âge | | Bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|---|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Débit respiratoire ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) | | $3,31 \cdot 10^{-5}$ | $5,97 \cdot 10^{-5}$ | $1,01 \cdot 10^{-4}$ | $1,77 \cdot 10^{-4}$ | $2,33 \cdot 10^{-4}$ | $2,57 \cdot 10^{-4}$ |
| Vitesse de dépôt ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | $5 \cdot 10^{-2}$ | 0,87 | 1,38 | 1,26 | 1,04 | 0,86 | 0,63 |
| | $3 \cdot 10^{-1}$ | 0,15 | 0,23 | 0,21 | 0,17 | 0,14 | 0,10 |

La dose à la thyroïde la plus élevée, de l'ordre de 1,4 mSv, est calculée pour un enfant âgé de 1 à 2 ans, en prenant en compte la vitesse de dépôt de $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. En effet, l'activité volumique intégrée sur le temps de la retombée est plus importante avec cette hypothèse de vitesse de dépôt et le produit du coefficient de dose à la thyroïde par inhalation et du débit respiratoire est le plus élevé pour cette classe d'âge.

VII.2 - DOSES PAR IRRADIATION EXTERNE

Ces doses sont identiques quel que soit l'âge de l'individu.

VII.2.1 - IRRADIATION EXTERNE PAR LE PANACHE

La dose par irradiation par le panache est calculée pour un individu présent à l'extérieur de son habitation pendant le passage du panache.

Pour les aérosols, l'activité volumique de l'air intégrée sur le temps de passage du panache est identique à celle utilisée pour le calcul de la dose par inhalation. Le rapport entre les gaz rares et les autres isotopes du terme source est déduit de celui estimé à partir de l'évolution dans le temps du terme source.

L'isotope qui contribue le plus à la dose, à 19%, est ^{135}I .

Tableau 5: Dose efficace par irradiation par le panache (mSv).

| Dépôt (Bq.m ⁻²) à la fin de la retombée | 1,6. 10 ⁷ Bq.m ⁻² | |
|---|---|-----------------------|
| Vitesse de dépôt (m.s ⁻¹) | 5. 10 ⁻² | 3. 10 ⁻¹ |
| Dose tous isotopes (mSv) | 9,9. 10 ⁻³ | 1,7. 10 ⁻³ |

La dose par irradiation externe par le panache est très faible, toujours inférieure à 0,01 mSv, quelle que soit la vitesse de dépôt associée au dépôt.

VII.2.2 - IRRADIATION EXTERNE PAR LES DEPOTS

Connaissant l'activité déposée pour les différents isotopes, on peut en déduire, dans un premier temps, le débit de dose dû au dépôt, puis, par intégration pour différents temps d'exposition, la dose due au dépôt. Celle ci évolue au cours du temps, selon la durée de présence de l'individu considéré sur le dépôt. Elle perdure au-delà du passage du panache.

On a supposé que les personnes passaient 2/3 du temps à l'extérieur, quelle que soit la durée d'exposition.

Le débit de dose calculé à H+11h est de 10 µSv.h⁻¹. Cette valeur est environ 3 fois plus faible que la mesure de 30 µGy.h⁻¹, effectuée à la fin de la retombée, vers H+11h40.

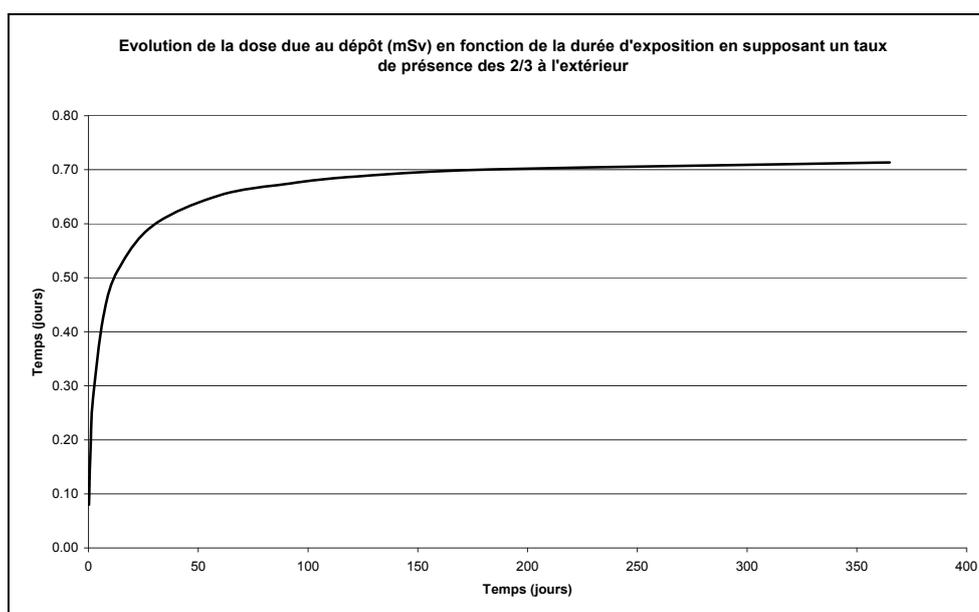


Figure 1 : Evolution de la dose due au dépôt (mSv) en fonction de la durée d'exposition pour un dépôt initial de 1,6. 10⁷ Bq.m⁻² – présence des 2/3 à l'extérieur.

La dose due au dépôt augmente rapidement au début de l'exposition. Par la suite, après la disparition des isotopes à vie courte, elle se stabilise à environ 0,70 mSv après 6 mois, en considérant un taux de présence des 2/3 à l'extérieur.

Tableau 6: Evolution de la dose efficace par irradiation due aux dépôts en fonction de la durée d'exposition – présence des 2/3 à l'extérieur.

| Dépôt initial | 1,6. 10 ⁷ Bq.m ⁻² | Isotopes contribuant le plus à la dose |
|---------------|---|---|
| tps présence | dose dépôt (mSv) | |
| 1 jour | 0,19 | ¹³⁵ I (18%), ¹³² Te (16%), ⁹⁷ Zr (13%), ¹³³ I (12%), ⁹¹ Sr (7%) |
| 2 jours | 0,27 | ¹³² Te (21%), ¹³⁵ I (14%), ⁹⁷ Zr (13%), ¹³³ I (12%), ¹⁴⁰ Ba (7%) |
| 1 semaine | 0,43 | ¹³² Te (29%), ¹⁴⁰ Ba (13%), ¹³³ I (9%), ⁹⁷ Zr (9%), ¹³⁵ I (9%) |
| 2 semaines | 0,52 | ¹³² Te (30%), ¹⁴⁰ Ba (18%), ¹³³ I (8%), ⁹⁷ Zr (8%), ¹³⁵ I (7%) |
| 1 mois | 0,60 | ¹³² Te (27%), ¹⁴⁰ Ba (24%), ¹³³ I (7%), ⁹⁷ Zr (7%), ¹³⁵ I (6%) |
| 6 mois | 0,70 | ¹⁴⁰ Ba (25%), ¹³² Te (23%), ⁹⁵ Zr (6%), ¹⁰³ Ru (6%), ¹³³ I (6%), ⁹⁷ Zr (6%), ¹³⁵ I (5%) |

VII.3 - DOSES PAR INGESTION AVEC PRISE EN COMPTE DE RATIONS ALIMENTAIRES

Les quantités ingérées quotidiennement par les adultes sont indiquées dans le Tableau 2.

Il faut noter qu'à Tureia, il n'y a, ni consommation de légumes feuilles, ni consommation de lait produit localement. Ces voies d'atteinte ne sont donc pas prises en compte dans les calculs.

VII.3.1 - DOSE DUE A LA CONSOMMATION D'EAU

Un calcul est réalisé à partir de l'évolution temporelle des mesures d'activités dans les citernes de Tureia :

- du 2 au 4 juillet, consommation d'eau de citerne peu contaminée, dont l'activité est évaluée à partir d'une mesure d'activité β globale de 74 Bq.l⁻¹ le 4 juillet. L'activité initiale est de 270 Bq.l⁻¹ à H+11h40, heure de début de consommation.
- après la pluie du 4 juillet, c'est-à-dire à partir du 5 juillet au matin, consommation d'eau de citerne dont l'activité est estimée à partir de la mesure β globale de 2400 Bq.l⁻¹ le 5 juillet.

La consommation se produit pendant 1 mois à partir de l'arrivée du panache à Tureia, c'est-à-dire H + 11h40.

Les consommations d'eau sont fonction de la classe d'âge.

L'activité de l'eau évolue selon la décroissance radioactive, à partir de l'activité mesurée aux deux dates indiquées. On a supposé que la répartition de l'activité des différents isotopes est identique entre le terme source et l'eau aux différents instants.

VII.3.1.1 - DOSE EFFICACE

Tableau 7: Dose efficace (mSv) due à la consommation d'eau.

| Classe d'âge | nourrisson | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|----------------------------|------------|---------|---------|----------|-----------|--------|
| Conso (l.j ⁻¹) | 0,30 | 0,50 | 0,50 | 0,75 | 1 | 1 |
| Dose totale (mSv) | 0,08 | 0,11 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,03 |

Compte tenu des hypothèses de quantité d'eau consommée, la dose efficace la plus élevée est calculée pour un enfant âgé de 1 à 2 ans. Elle est au plus de 0,11 mSv.

VII.3.1.2 - DOSE A LA THYROÏDE

Tableau 8: Dose à la thyroïde (mSv) due à la consommation d'eau.

| Classe d'âge | nourrisson | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|----------------------|------------|---------|---------|----------|-----------|--------|
| Conso ($l.j^{-1}$) | 0,30 | 0,50 | 0,50 | 0,75 | 1 | 1 |
| Dose totale (mSv) | 0,83 | 1,24 | 0,71 | 0,50 | 0,45 | 0,29 |

Compte tenu des hypothèses de quantité d'eau consommée, les doses les plus élevées sont calculées pour des enfants âgés de 1 à 2 ans. Cette dose est au plus de l'ordre de 1,25 mSv.

VII.3.2 - DOSE DUE A LA CONSOMMATION DE FRUITS

Deux calculs ont été réalisés :

- le premier à partir de la mesure de $4,72 \cdot 10^3 \text{ Bq.kg}^{-1}$ en activité β globale le 5 juillet dans de l'arbre à pain prélevé le 3 juillet (cf. Tableau 20). La consommation dure 1 mois à partir de la date de prélèvement, le 3 juillet. L'activité β globale initiale est de $1,34 \cdot 10^4 \text{ Bq.kg}^{-1}$.
- le second à partir d'une mesure de $4,42 \cdot 10^3 \text{ Bq.kg}^{-1}$ en activité β globale le 5 juillet dans une papaye prélevée le 3 juillet (cf. Tablea 20), en considérant une consommation pendant 1 mois à partir de la date de prélèvement, le 3 juillet. L'activité β globale initiale est de $1,25 \cdot 10^4 \text{ Bq.kg}^{-1}$.

La consommation de fruits prend en compte la consommation totale de fruits (cf. Tableau 20) pendant 1 mois à partir de la date de prélèvement, en supposant que l'activité dans les fruits évolue selon la décroissance radioactive.

On considère des consommations fonction de la classe d'âge et on a supposé que le nourrisson ne consomme pas de fruits.

VII.3.2.1 - DOSE EFFICACE DUE A LA CONSOMMATION DE FRUITS

Tableau 9: Dose efficace (mSv) due à la consommation de fruits – calculs à partir d'activités mesurées.

| Classe d'âge | Aliment | nourrisson | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|------------------------------|--------------|------------|---------|---------|----------|-----------|--------|
| Conso (kg.j^{-1}) | | 0 | 0,03 | 0,05 | 0,10 | 0,17 | 0,17 |
| Dose 1 mois (mSv) | Arbre à pain | - | 0,019 | 0,016 | 0,018 | 0,019 | 0,014 |
| Dose 1 mois (mSv) | Papaye | - | 0,018 | 0,015 | 0,017 | 0,018 | 0,013 |

Quelle que soit la classe d'âge, la dose efficace due à la consommation de fruits est inférieure à 0,02 mSv.

VII.3.2.2 - DOSE A LA THYROÏDE DUE A LA CONSOMMATION DE FRUITS

Tableau 10: Dose à la thyroïde (mSv) due à la consommation de fruits - calculs à partir d'activités mesurées.

| Classe d'âge | Aliment | nourrisson | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|---|--------------|------------|---------|---------|----------|-----------|--------|
| Conso ($\text{kg}\cdot\text{j}^{-1}$) | | 0 | 0,03 | 0,05 | 0,10 | 0,17 | 0,17 |
| Dose 1 mois (mSv) | Arbre à pain | - | 0,22 | 0,20 | 0,19 | 0,22 | 0,14 |
| Dose 1 mois (mSv) | Papaye | - | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,20 | 0,13 |

Quelle que soit la classe d'âge, la dose à la thyroïde due à la consommation de fruits est inférieure à 0,3 mSv.

VII.3.3 - DOSE DUE A LA CONSOMMATION DE PRODUITS ANIMAUX

No measurement were done in meat. The doses due to this exposure pathway can be assessed but it is not usually a dominant way, as has been noted in assessments of doses due to other atmospheric tests.

VII.3.3.1 - CONSOMMATION DE POISSONS

Deux calculs sont effectués :

- le premier à partir des mesures dans du poisson chirurgical (*acanthuridae*). On prend en compte la mesure de $7,5 \cdot 10^3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ obtenue le 5 juillet dans du chirurgical prélevé le 3 juillet (cf. Tableau 20). L'activité β globale de cet échantillon est de $2,13 \cdot 10^4$ le 3 juillet, date du premier prélèvement et date supposée de début de consommation. Par la suite, on évalue une activité β globale à partir de l'évolution des mesures dans le temps.
- le second à partir de la mesure de $1,3 \cdot 10^3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ en activité β globale le 5 juillet, dans du mérou prélevé le 3 juillet (cf. Tableau 20), conduisant à une dose "minimale". L'activité est de $3,68 \cdot 10^3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ le 3 juillet, date de prélèvement et date supposée de début de consommation. Du 3 juillet au 5 juillet, l'activité évolue selon la décroissance radioactive ; par la suite, à partir du 6 juillet, les mesures montrant peu d'évolution dans le temps, l'activité est supposée constante et égale à $778 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Faute d'informations précises sur les transferts des différents isotopes aux poissons, on a supposé que les rapports des activités dans le dépôt et les poissons sont identiques.

La consommation est supposée se produire quotidiennement pendant 1 mois à partir des dates de prélèvement (cf. Tableau 20).

On considère des consommations fonction de la classe d'âge et on suppose que le nourrisson ne consomme pas de poisson.

DOSE EFFICACE

Tableau 11: Dose efficace (mSv) due à la consommation de poissons.

| Classe d'âge | Poisson | nourrisson | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|---|-------------|------------|---------|---------|----------|-----------|--------|
| Conso ($\text{kg}\cdot\text{j}^{-1}$) | | 0 | 0,15 | 0,20 | 0,30 | 0,47 | 0,47 |
| Dose 1 mois (mSv) | Chirurgical | - | 0,25 | 0,17 | 0,14 | 0,14 | 0,10 |
| Dose 1 mois (mSv) | Mérou | - | 0,019 | 0,013 | 0,011 | 0,011 | 0,008 |

La dose efficace due à la consommation de poissons est au plus de l'ordre de 0,25 mSv, pour un enfant âgé de 1 à 2 ans, en supposant une consommation journalière pendant 1 mois de chirurgien.

DOSE A LA THYROÏDE

Tableau 12: Dose à la thyroïde (mSv) due à la consommation de poissons.

| Classe d'âge | Poisson | nourrisson | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|-----------------------------|------------|------------|---------|---------|----------|-----------|--------|
| Conso (kg.j ⁻¹) | | 0 | 0,15 | 0,20 | 0,3 | 0,47 | 0,47 |
| Dose 1 mois (mSv) | Chirurgien | - | 2,8 | 2,1 | 1,5 | 1,6 | 1,0 |
| Dose 1 mois (mSv) | Mérou | - | 0,22 | 0,16 | 0,11 | 0,12 | 0,08 |

La dose maximale à la thyroïde due à la consommation de poissons est évaluée pour un enfant âgé de 1 à 2 ans et est au plus de 2,8 mSv, en supposant une consommation quotidienne de poisson chirurgien.

VII.3.3.2 - CONSOMMATION DE MOLLUSQUES

Deux calculs ont été effectués à partir de mesures dans des mollusques :

- le premier, à partir d'une mesure de $6,93 \cdot 10^5 \text{ Bq.kg}^{-1}$ en activité β globale le 5 juillet dans un bénitier prélevé le 3 juillet (cf. Tableau 20), qui permet d'évaluer une dose "maximale". L'activité calculée à l'aide des périodes radioactives est de $1,96 \cdot 10^6 \text{ Bq.kg}^{-1}$ le 3 juillet, date de prélèvement, supposée égale à la date de début de consommation. Par la suite, on suppose que l'activité dans le bénitier évolue pendant 1 mois, comme les mesures présentées dans le Tableau 20 ;
- le second, à partir d'une mesure de $2,02 \cdot 10^3 \text{ Bq.kg}^{-1}$ en activité β globale le 18 juillet dans du turbo prélevé le 11 juillet, qui permet d'évaluer une dose "minimale". L'activité calculée à l'aide des périodes radioactives est de $4,7 \cdot 10^3 \text{ Bq.kg}^{-1}$ le 11 juillet, date de prélèvement, supposée égale à la date de début de consommation.

Faute d'informations précises sur l'activité de l'eau et les transferts des différents isotopes aux mollusques, on suppose que les rapports des activités dans le dépôt et les mollusques sont identiques.

On considère des consommations fonction de la classe d'âge et on suppose que le nourrisson ne consomme pas de ce type d'aliment.

On a pris en compte une ration correspondant au total de la quantité consommée en mollusques (cf. Tableau 2).

DOSE EFFICACE

Tableau 13: Dose efficace (mSv) due à la consommation de mollusques.

| Classe d'âge | Mollusque | nourrisson | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|-----------------------------|-----------|------------|---------|---------|----------|-----------|--------|
| Conso (kg.j ⁻¹) | | 0 | 0,03 | 0,05 | 0,10 | 0,19 | 0,19 |
| Dose 1 mois (mSv) | Bénitier | - | 2,80 | 2,38 | 2,68 | 3,08 | 2,28 |
| Dose 1 mois (mSv) | Turbo | - | 0,030 | 0,025 | 0,030 | 0,034 | 0,025 |

Quelle que soit la classe d'âge considérée, la dose efficace due à la consommation de mollusques est au plus de l'ordre de 3,1 mSv, en supposant une consommation journalière de bécotiers pendant 1 mois. La dose maximale est évaluée pour les enfants âgés de 12 à 17 ans, qui mangent autant que les adultes. Si on considère 2 mois de consommation en supposant que l'activité continue d'évoluer selon la décroissance radioactive, la dose efficace augmente d'environ 9% ; entre 2 et 6 mois, la dose augmente d'environ 10%.

DOSE A LA THYROÏDE

Tableau 14: Dose à la thyroïde (mSv) due à la consommation de mollusques.

| Classe d'âge | Mollusque | nourrisson | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|-----------------------------|-----------|------------|---------|---------|----------|-----------|--------|
| Conso (kg.j ⁻¹) | | 0 | 0,03 | 0,05 | 0,10 | 0,19 | 0,19 |
| Dose 1 mois (mSv) | Bécotier | - | 31,8 | 29,8 | 27,9 | 35,3 | 22,5 |
| Dose 1 mois (mSv) | Turbo | - | 0,34 | 0,33 | 0,31 | 0,40 | 0,26 |

La dose à la thyroïde due à la consommation de mollusques est au plus de l'ordre de 35 mSv en supposant une consommation quotidienne de bécotiers pendant 1 mois. Cette dose est évaluée pour un enfant de 12 à 17 ans. Après 2 mois de consommation, la dose à la thyroïde augmente d'environ 5% ; entre 2 et 6 mois, cette dose augmente de moins de 1%. La dose à la thyroïde est donc essentiellement due à la consommation du premier mois.

VIII - BILAN DES DOSES ESTIMEES

Le tableau suivant synthétise les doses calculées, en indiquant les valeurs minimales et maximales évaluées pour les enfants âgés de 1 à 2 ans et les adultes.

Tableau 15: Synthèse des doses efficaces (mSv).

| Valeur de dose | Enfant 1-2 ans | | Adulte | |
|--------------------------|----------------|------------|-------------|------------|
| | minimale | maximale | minimale | maximale |
| dose dépôt 6 mois | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| dose panache | 0,0017 | 0,0099 | 0,0017 | 0,0099 |
| dose efficace inhalation | 0,019 | 0,11 | 0,012 | 0,07 |
| eau de citerne | 0,11 | 0,11 | 0,03 | 0,03 |
| végétaux (fruits) | 0,018 | 0,019 | 0,013 | 0,014 |
| poissons | 0,019 | 0,25 | 0,008 | 0,10 |
| mollusques | 0,03 | 2,8 | 0,025 | 2,28 |
| total ingestion interne | 0,18 | 3,2 | 0,08 | 2,4 |
| (inhalation + ingestion) | 0,20 | 3,3 | 0,09 | 2,5 |
| total | 0,90 | 4,0 | 0,79 | 3,2 |

Tableau 16: Synthèse des doses internes à la thyroïde (mSv).

| Dose | Enfant 1-2 ans | | Adulte | |
|---|----------------|-------------|------------|-------------|
| | minimum | maximum | minimum | Maximum |
| dose thyroïde inhalation | 0,23 | 1,38 | 0,10 | 0,63 |
| eau de citerne | 1,24 | 1,24 | 0,29 | 0,29 |
| végétaux (fruits) | 0,20 | 0,22 | 0,13 | 0,14 |
| poissons | 0,22 | 2,8 | 0,08 | 1,0 |
| mollusques | 0,34 | 31,8 | 0,26 | 22,5 |
| total ingestion | 2,0 | 36,1 | 0,8 | 23,9 |
| interne (inhalation + ingestion) | 2,2 | 37,4 | 0,9 | 24,6 |

IX - COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS

Les expositions radiologiques calculées varient fortement selon la contamination des aliments consommés, notamment les mollusques, les poissons et l'eau de boisson.

Les cas minimum et maximum présentés dans le Tableau 15 et le Tableau 16 correspondent à une contamination, soit faible, soit très élevée des aliments.

Lorsque les denrées sont très contaminées, la contribution prédominante à la dose efficace est l'ingestion, notamment de mollusques. Lorsque les denrées sont peu contaminées, la contribution prédominante à la dose efficace est l'irradiation par les dépôts.

La classe d'âge la plus exposée est constituée des enfants âgés de 1 à 2 ans, qui ont une alimentation variée, composée des mêmes aliments que les adultes.

Ainsi, selon le cas, l'irradiation par les dépôts contribue d'environ 80% à moins de 20% à la dose efficace pour un enfant âgé de 1 à 2 ans. Pour cette même classe d'âge, la consommation de mollusques contribue de 3 à 70% à la dose efficace (cf. Figure 2 et Figure 3).

Pour un adulte, la contribution de la consommation de mollusques à la dose efficace varie de 3 à plus de 70% (cf. Figure 4 et Figure 5).

La dose efficace maximale pour un enfant de 1 à 2 ans vivant à Tureia est de 4 mSv, due en grande partie à la consommation de mollusques. La dose efficace maximale pour un adulte est de 3,2 mSv.

Les doses maximales à la thyroïde les plus importantes sont essentiellement dues à la consommation de mollusques (cf. Figure 7 et Figure 9).

Les doses internes à la thyroïde pour un enfant âgé de 1 à 2 ans et un adulte de Tureia sont respectivement au plus de 37,4 et 24,6 mSv.

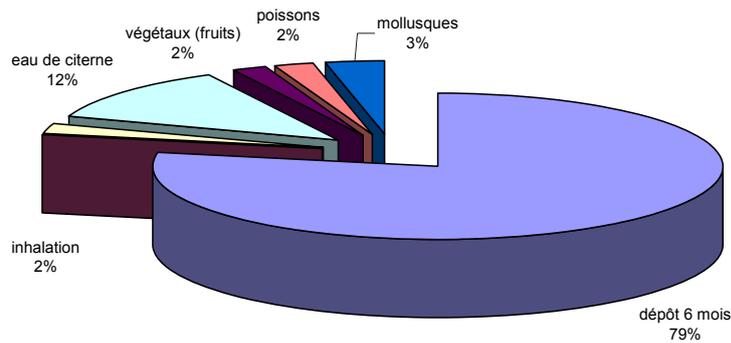


Figure 2 : Contribution relative des voies d'atteinte à la dose efficace – Enfants de 1 à 2 ans consommant des aliments peu contaminés.

Dans le cas des enfants âgés de 1 à 2 ans consommant des aliments peu contaminés, la dose efficace est de 0,90 mSv.

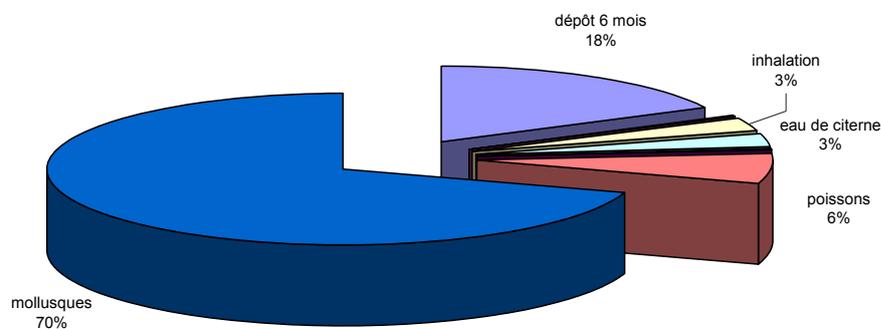


Figure 3: Contribution relative des voies d'atteinte à la dose efficace – Enfants de 1 à 2 ans consommant des aliments les plus contaminés.

Dans le cas des enfants âgés de 1 à 2 ans consommant des aliments les plus contaminés, la dose efficace est de 4,0 mSv.

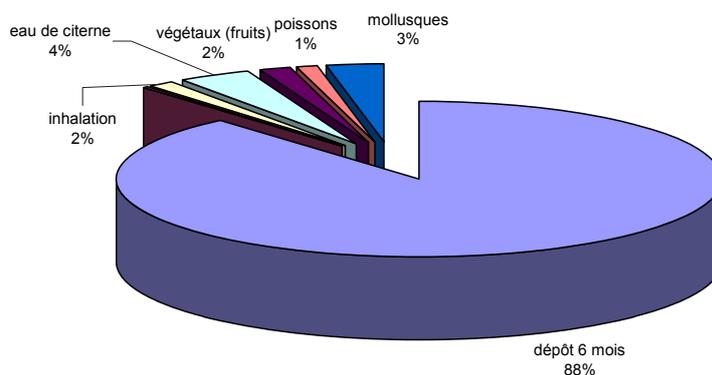


Figure 4: Contribution relative des voies d'atteinte à la dose efficace – Adultes consommant des aliments peu contaminés.

Dans le cas des adultes consommant des aliments peu contaminés, la dose efficace est de 0,79 mSv.

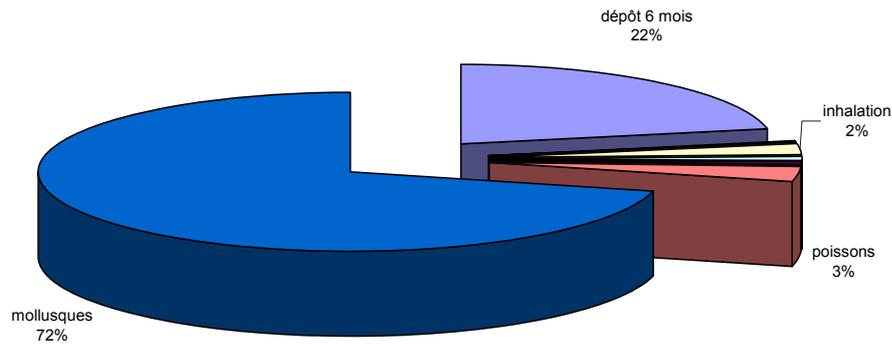


Figure 5: Contribution relative des voies d'atteinte à la dose efficace – Adultes consommant des aliments les plus contaminés.

Dans le cas des adultes consommant des aliments les plus contaminés, la dose efficace est de 3,2 mSv.

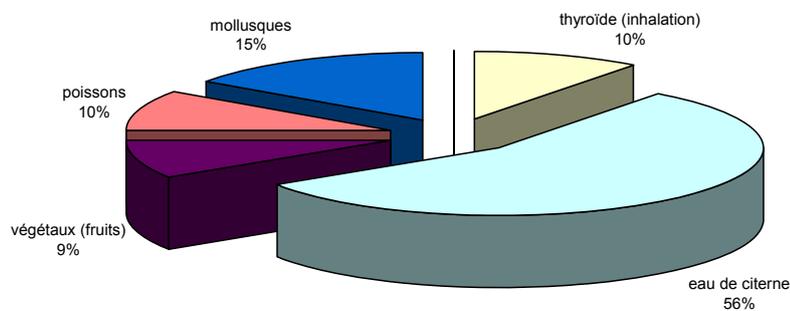


Figure 6: Contribution relative des voies d'atteinte à la dose interne à la thyroïde – Enfants de 1 à 2 ans consommant des aliments peu contaminés.

Dans le cas des enfants âgés de 1 à 2 ans consommant des aliments peu contaminés, la dose à la thyroïde est 2,2 mSv.

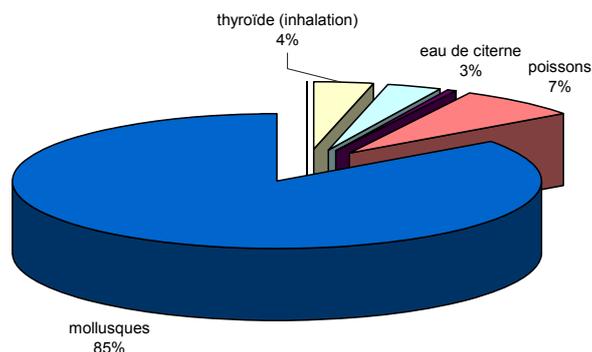


Figure 7: Contribution relative des voies d'atteinte à la dose interne à la thyroïde – Enfants de 1 à 2 ans consommant des aliments les plus contaminés.

Dans le cas des enfants âgés de 1 à 2 ans consommant des aliments les plus contaminés, la dose à la thyroïde est 37,4 mSv.

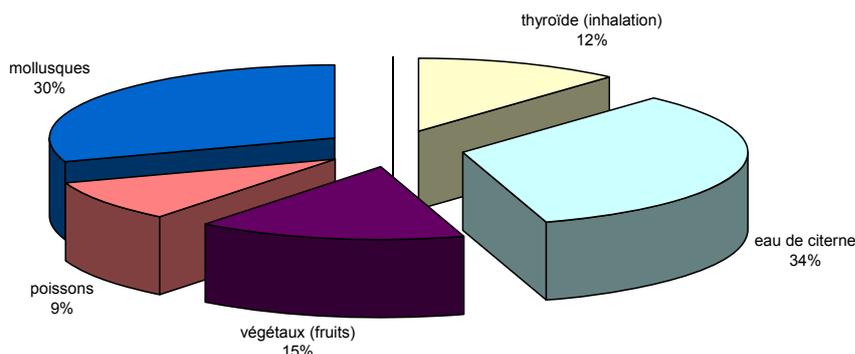


Figure 8: Contribution relative des voies d'atteinte à la dose à la thyroïde – Adultes consommant des aliments peu contaminés.

Dans le cas des adultes consommant des aliments peu contaminés, la dose à la thyroïde est de 0,90 mSv.

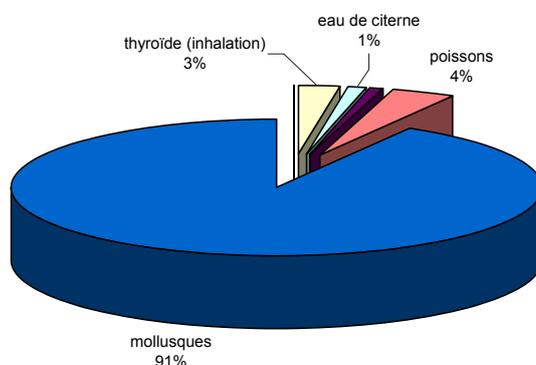


Figure 9: Contribution relative des voies d'atteinte à la dose à la thyroïde – Adultes consommant des aliments les plus contaminés.

Dans le cas des adultes consommant des aliments les plus contaminés, la dose à la thyroïde est de 24,6 mSv.

X - CONCLUSION

Ce document présente les calculs d'impact dosimétrique sur la population de Tureia des retombées de l'essai atmosphérique ARCTURUS, réalisé le 2 juillet 1967. Toutes les voies d'atteinte sont considérées : l'inhalation (doses efficaces et doses à la thyroïde), l'irradiation externe (doses efficaces par le panache et les dépôts), l'ingestion (doses efficaces et doses à la thyroïde).

A partir de mesures d'activités dans l'environnement (dépôt et produits de la chaîne alimentaire) couplées au calcul de terme source, il a été possible de déduire toutes les grandeurs nécessaires aux évaluations d'impact : l'activité de chaque isotope dans le panache, l'activité de chaque radionucléide dans les produits végétaux et animaux et leur évolution au cours du temps. Les calculs de doses par ingestion ont également pris en compte les différentes quantités consommées en fonction de l'âge de l'individu.

Afin d'obtenir les doses enveloppes reçues par les populations, deux vitesses de dépôt des radionucléides ont été prises en compte. Les évaluations de dose par inhalation et de dose externe par le panache les plus élevées sont obtenues en utilisant une vitesse de dépôt de 0,05 m.s⁻¹.

La dose efficace maximale pour un enfant de 1 à 2 ans vivant à Tureia est de 4 mSv, due en grande partie à la consommation de mollusques, notamment de bénitier. La dose efficace maximale pour un adulte est de 3,2 mSv.

Les doses internes à la thyroïde pour un enfant âgé de 1 à 2 ans et un adulte de Tureia sont respectivement au plus de 37,5 et 25 mSv.

Lorsque les mollusques sont très contaminés, les doses sont essentiellement dues à la voie ingestion, notamment à la consommation de bénitiers.

XI - ANNEXE : DONNEES DE CALCUL

XI.1 - ISOTOPES MAJORITAIRES DANS LE TERME SOURCE

Tableau 17: Isotopes présents dans le nuage et le dépôt (hors gaz rares) à H + 11h40.

| Isotope | Période (s) | % avec GR | % sans GR |
|--------------------|-------------|-----------|-----------|
| ²³⁹ Np | 2.03E+05 | 12.40 | 13.94 |
| ¹³⁵ Xe | 3.29E+04 | 8.07 | - |
| ¹³⁵ I | 2.37E+04 | 6.35 | 7.13 |
| ¹³³ I | 7.49E+04 | 5.30 | 5.96 |
| ^{97m} Nb | 4.33E+03 | 4.94 | 5.56 |
| ⁹² Y | 1.27E+04 | 4.69 | 5.27 |
| ⁹⁷ Zr | 6.03E+04 | 4.59 | 5.16 |
| ¹⁰⁵ Ru | 1.60E+04 | 4.47 | 5.02 |
| ⁹⁷ Nb | 5.27E+01 | 4.37 | 4.91 |
| ¹⁴¹ La | 1.41E+04 | 4.19 | 4.72 |
| ⁹³ Y | 3.66E+04 | 4.18 | 4.70 |
| ¹⁴⁵ Pr | 2.15E+04 | 3.15 | 3.54 |
| ⁹¹ Sr | 3.47E+04 | 2.90 | 3.26 |
| ¹⁰⁵ Rh | 1.27E+05 | 2.43 | 2.73 |
| ¹⁴³ Ce | 1.19E+05 | 2.39 | 2.69 |
| ⁹⁹ Mo | 2.37E+05 | 1.88 | 2.11 |
| ^{91m} Y | 2.98E+03 | 1.87 | 2.10 |
| ¹³² I | 8.26E+03 | 1.49 | 1.67 |
| ⁹² Sr | 9.76E+03 | 1.41 | 1.59 |
| ¹³² Te | 2.77E+05 | 1.39 | 1.56 |
| ¹²⁹ Te | 4.18E+03 | 1.31 | 1.47 |
| ^{99m} Tc | 2.16E+04 | 1.28 | 1.44 |
| ^{105m} Rh | 4.00E+01 | 1.27 | 1.43 |
| ¹²⁹ Sb | 1.57E+04 | 1.15 | 1.30 |
| ^{135m} Xe | 9.17E+02 | 1.09 | - |
| ¹²⁸ Sb | 3.24E+04 | 0.99 | 1.11 |
| ⁸⁸ Rb | 1.07E+03 | 0.77 | 0.87 |
| ⁸⁸ Kr | 1.02E+04 | 0.69 | - |
| ^{109m} Ag | 3.96E+01 | 0.60 | 0.67 |
| ¹⁰⁹ Pd | 4.93E+04 | 0.60 | 0.67 |
| ^{131m} Te | 1.08E+05 | 0.54 | 0.60 |
| ¹⁴⁹ Pm | 1.91E+05 | 0.50 | 0.56 |
| ¹⁵¹ Pm | 1.02E+05 | 0.49 | 0.55 |
| ^{85m} Kr | 1.61E+04 | 0.42 | - |
| ¹⁴⁰ Ba | 1.10E+06 | 0.40 | 0.44 |

| Isotope | Période (s) | % avec GR | % sans GR |
|--------------------|-------------|-----------|-----------|
| ¹⁴² La | 5.47E+03 | 0.39 | 0.44 |
| ¹³¹ I | 6.93E+05 | 0.37 | 0.41 |
| ¹³³ Xe | 4.53E+05 | 0.37 | - |
| ^{83m} Kr | 6.59E+03 | 0.34 | - |
| ²³⁷ U | 5.83E+05 | 0.31 | 0.35 |
| ¹³⁹ Ba | 4.98E+03 | 0.31 | 0.35 |
| ¹¹² Ag | 1.13E+04 | 0.21 | 0.23 |
| ¹¹² Pd | 7.31E+04 | 0.20 | 0.22 |
| ¹⁵³ Sm | 1.67E+05 | 0.18 | 0.20 |
| ¹⁴⁷ Nd | 9.49E+05 | 0.18 | 0.20 |
| ¹⁴⁹ Nd | 6.22E+03 | 0.17 | 0.19 |
| ¹⁰³ Ru | 3.39E+06 | 0.16 | 0.18 |
| ^{103m} Rh | 3.37E+03 | 0.16 | 0.18 |
| ¹⁵⁶ Sm | 3.38E+04 | 0.15 | 0.17 |
| ¹⁴¹ Ce | 2.81E+06 | 0.13 | 0.15 |
| ¹²⁷ Sb | 3.33E+05 | 0.13 | 0.15 |
| ⁸³ Br | 8.64E+03 | 0.13 | 0.14 |
| ¹¹³ Ag | 1.93E+04 | 0.13 | 0.14 |
| ¹³¹ Te | 1.50E+03 | 0.11 | 0.13 |
| ^{117m} In | 6.97E+03 | 0.09 | 0.10 |
| ¹⁵⁷ Eu | 5.46E+04 | 0.09 | 0.10 |
| ¹²¹ Sn | 9.74E+04 | 0.09 | 0.10 |
| ¹¹⁷ In | 2.59E+03 | 0.09 | 0.10 |
| ¹²⁷ Sn | 7.56E+03 | 0.08 | 0.09 |
| ¹⁴⁰ La | 1.45E+05 | 0.08 | 0.09 |
| ⁹⁵ Zr | 5.53E+06 | 0.07 | 0.08 |
| ¹⁴³ Pr | 1.17E+06 | 0.06 | 0.07 |
| ¹³⁴ I | 3.15E+03 | 0.06 | 0.07 |
| ¹²⁷ Te | 3.37E+04 | 0.06 | 0.07 |
| ¹¹⁵ Cd | 1.92E+05 | 0.06 | 0.06 |
| ¹¹¹ Ag | 6.44E+05 | 0.05 | 0.06 |
| ^{115m} In | 1.62E+04 | 0.05 | 0.05 |
| ^{133m} Xe | 1.89E+05 | 0.04 | - |
| ⁸⁷ Kr | 4.58E+03 | 0.04 | - |
| ⁸⁹ Sr | 4.37E+06 | 0.04 | 0.04 |
| ¹¹⁷ Cd | 8.96E+03 | 0.04 | 0.04 |
| ¹⁵⁹ Gd | 6.65E+04 | 0.03 | 0.03 |
| ⁹¹ Y | 5.06E+06 | 0.02 | 0.03 |
| ^{117m} Cd | 1.21E+04 | 0.02 | 0.02 |
| ¹⁴⁴ Pr | 1.04E+03 | 0.01 | 0.01 |
| ¹⁴⁴ Ce | 2.46E+07 | 0.01 | 0.01 |
| ^{133m} Te | 3.32E+03 | 0.01 | 0.01 |
| ¹²⁵ Sn | 8.33E+05 | 0.01 | 0.01 |
| ¹⁰⁶ Ru | 3.22E+07 | 0.01 | 0.01 |
| ¹⁰⁶ Rh | 3.00E+01 | 0.01 | 0.01 |
| ^{129m} Te | 2.90E+06 | 0.01 | 0.01 |
| ¹³⁰ I | 4.45E+04 | 0.01 | 0.01 |

XI.2 - MESURES DANS LES MILIEUX

XI.2.1 - ACTIVITE DE L'AIR

Le Tableau 18 présente l'évolution de l'activité relevée sur des filtres d'appareils de prélèvement d'aérosols installés à Tureia.

Tableau18: Activités volumiques dans l'air relevées à Tureia du 01/07/1967 au 09/07/1967 (Bq.m⁻³).

| filtres | APA1 | | APA 100 | |
|------------|--------------------|---------|--------------------|---------|
| | Bq.m ⁻³ | Bq | Bq.m ⁻³ | Bq |
| 01/07/1967 | 3.7E-02 | 1.1E+00 | 6.7E-02 | 1.5E+02 |
| 02/07/1967 | 6.3E+00 | 1.9E+02 | 5.9E+01 | 1.3E+05 |
| 03/07/1967 | 9.0E-01 | 2.7E+01 | 1.4E+00 | 3.1E+03 |
| 04/07/1967 | 3.4E-01 | 1.0E+01 | 2.7E-01 | 5.9E+02 |
| 05/07/1967 | 1.7E+00 | 5.2E+01 | 1.1E+00 | 2.5E+03 |
| 06/07/1967 | 3.8E-01 | 1.1E+01 | 2.2E-01 | 4.4E+02 |
| 07/07/1967 | 3.0E-01 | 9.0E+00 | 4.5E-01 | 9.6E+02 |
| 08/07/1967 | 8.5E-02 | 2.6E+00 | 5.2E-02 | 1.1E+02 |
| 09/07/1967 | 5.9E-02 | 1.8E+00 | 4.4E-02 | 9.8E+01 |

XI.2.2 - ACTIVITE DANS L'EAU DE CITERNE DE TUREIA

L'activité globale en produits de fission dans l'eau de la citerne de Tureia est présentée dans le Tableau 19. Par ailleurs, on, dispose d'une mesure d'activité dans l'eau de la "petite" citerne extérieure au village prélevée et mesurée le 4 juillet. La valeur indiquée est de 74 Bq.l⁻¹.

Tableau 19: Activité (mélange de PF) dans l'eau de la citerne de Tureia (Bq.l⁻¹).

| date | Bq.l ⁻¹ |
|------------|--------------------|
| 02/07/1967 | 14,8 |
| 05/07/1967 | 2400 |
| 06/08/1967 | 11,1 |

XI.2.3 - ACTIVITE DANS LES ALIMENTS

Le Tableau 20 présente l'évolution au cours des mois de juillet et août 1967 de l'activité dans différents produits prélevés à Tureia.

Tableau 20 : Activité globale dans des prélèvements réalisés à Tureia (Bq.kg⁻¹) en juillet et en août 1967.

| Prélèvement | Espèce | Date de prélèvement | Date de la mesure | Activité à la date de mesure |
|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|------------------------------|
| | | | | Bq.kg ⁻¹ |
| Carica | Papaye | 03/07/1967 | 05/07/1967 | 4.42E+03 |
| | | 07/07/1967 | 11/07/1967 | 1.20E+03 |
| | | 12/07/1967 | 21/07/1967 | 3.94E+02 |
| | | 24/07/1967 | 03/08/1967 | 1.05E+02 |
| | | 07/08/1967 | 10/08/1967 | 8.66E+01 |
| Artocarpus | Arbre à pain | 03/07/1967 | 05/07/1967 | 4.72E+03 |
| | | 07/07/1967 | 10/07/1967 | 2.46E+03 |
| | | 12/07/1967 | 18/07/1967 | 7.50E+02 |
| | | 24/07/1967 | 02/08/1967 | 2.89E+02 |
| | | 07/08/1967 | 10/08/1967 | 3.13E+02 |
| Acanthuridae | Poisson chirurgien | 03/07/1967 | 05/07/1967 | 7.50E+03 |
| | | 06/07/1967 | 17/07/1967 | 1.44E+03 |
| | | 10/07/1967 | 18/07/1967 | 2.41E+02 |
| | | 11/07/1967 | 18/07/1967 | 1.66E+04 |
| | | 17/07/1967 | 07/08/1967 | 4.90E+02 |
| | | 18/07/1967 | 06/08/1967 | 8.75E+02 |
| | | 06/08/1967 | 10/08/1967 | 9.62E+01 |
| 07/08/1967 | 11/08/1967 | 6.73E+02 | | |
| Scaridae | Poisson perroquet | 03/07/1967 | 05/07/1967 | 1.73E+03 |
| | | 06/07/1967 | 11/07/1967 | 3.08E+03 |
| | | 10/07/1967 | 18/07/1967 | 5.77E+02 |
| | | 11/07/1967 | 21/07/1967 | 1.20E+03 |
| | | 17/07/1967 | 06/08/1967 | 3.32E+02 |
| | | 18/07/1967 | 06/08/1967 | 3.99E+02 |
| | | 24/07/1967 | 04/08/1967 | 5.97E+02 |
| | | 24/07/1967 | 04/08/1967 | 4.10E+02 |
| Mulet | Poisson | 03/07/1967 | 05/07/1967 | 5.58E+03 |
| | | 19/07/1967 | 06/08/1967 | 1.73E+02 |
| | | 24/07/1967 | 04/08/1967 | 4.58E+02 |
| Mérrou | Poisson | 03/07/1967 | 05/07/1967 | 1.30E+03 |
| | | 06/07/1967 | 11/07/1967 | 2.41E+02 |
| | | 10/07/1967 | 18/07/1967 | 2.41E+02 |
| | | 17/07/1967 | 04/08/1967 | 4.47E+02 |
| | | 24/07/1967 | 06/08/1967 | 1.44E+02 |
| | | 07/08/1967 | 11/08/1967 | 1.87E+02 |
| | | 07/08/1967 | 11/08/1967 | 5.77E+02 |
| 07/08/1967 | 23/08/1967 | 3.94E+02 | | |
| Carangidae | Poisson | 07/08/1967 | 11/08/1967 | 1.31E+02 |
| Shyranea barracuda | Poisson | 03/07/1967 | 05/07/1967 | 2.11E+03 |
| Chair tridacne | Mollusque bénitier | 03/07/1967 | 05/07/1967 | 6.93E+05 |
| | | 11/07/1967 | 19/07/1967 | 2.83E+04 |
| | | 19/07/1967 | 03/08/1967 | 9.76E+03 |
| | | 19/07/1967 | 07/08/1967 | 7.22E+03 |
| 07/08/1967 | 26/08/1967 | 2.21E+03 | | |
| Turbo | Mollusque | 11/07/1967 | 18/07/1967 | 2.02E+03 |

XI.3 - COEFFICIENTS DE DOSE

Tableau 21: Coefficients de dose efficace par irradiation par le dépôt et par inhalation.

| | période | Cd dépôt | Coefficient dose efficace - inhalation (Sv.Bq ⁻¹) | | | | | |
|--------------|----------|-----------------------------|---|-----------|-----------|------------|-------------|----------|
| | | (Sv/h)/(Bq/m ³) | enfant | 1-2 years | 2-7 years | 7-12 years | 12-17 years | Adult |
| C14 aérosols | 5.73E3 a | 5.80E-17 | bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | adulte |
| Br83 | 2.39 h | 2.93E-14 | 1.90E-08 | 1.70E-08 | 1.10E-08 | 7.40E-09 | 6.40E-09 | 5.80E-09 |
| Rb88 | 0.297 h | 2.14E-12 | 3.50E-10 | 2.30E-10 | 1.10E-10 | 7.70E-11 | 5.90E-11 | 4.80E-11 |
| Sr91 | 9.50 h | 3.52E-12 | 1.90E-10 | 1.20E-10 | 5.20E-11 | 3.20E-11 | 1.90E-11 | 1.60E-11 |
| Sr92 | 2.71 h | 4.50E-12 | 3.10E-09 | 2.20E-09 | 1.10E-09 | 6.90E-10 | 4.40E-10 | 3.70E-10 |
| Y91 m | 0.828 h | 1.88E-12 | 1.90E-09 | 1.40E-09 | 6.50E-10 | 4.10E-10 | 2.50E-10 | 2.10E-10 |
| Y92 | 3.54 h | 9.11E-13 | 7.40E-11 | 5.90E-11 | 3.10E-11 | 2.00E-11 | 1.40E-11 | 1.10E-11 |
| Y93 | 10.1 h | 3.28E-13 | 1.90E-09 | 1.20E-09 | 5.50E-10 | 3.50E-10 | 2.10E-10 | 1.80E-10 |
| Zr97 | 16.9 h | 3.05E-12 | 4.60E-09 | 3.00E-09 | 1.40E-09 | 8.50E-10 | 5.00E-10 | 4.20E-10 |
| Nb97 | 1.20 h | 2.32E-12 | 7.80E-09 | 5.30E-09 | 2.80E-09 | 1.80E-09 | 1.10E-09 | 9.20E-10 |
| Mo99 | 2.75 j | 5.29E-13 | 3.70E-10 | 2.50E-10 | 1.20E-10 | 7.70E-11 | 5.20E-11 | 4.30E-11 |
| Tc99 m | 6.02 h | 4.36E-13 | 6.00E-09 | 4.40E-09 | 2.20E-09 | 1.50E-09 | 1.10E-09 | 8.90E-10 |
| Ru103 | 39.3 j | 1.67E-12 | 1.30E-10 | 9.90E-11 | 5.10E-11 | 3.40E-11 | 2.40E-11 | 1.90E-11 |
| Ru105 | 4.44 h | 2.77E-12 | 1.10E-08 | 8.40E-09 | 5.00E-09 | 3.50E-09 | 3.00E-09 | 2.40E-09 |
| Rh105 | 1.47 j | 2.74E-13 | 1.30E-09 | 9.20E-10 | 4.50E-10 | 3.00E-10 | 2.00E-10 | 1.70E-10 |
| Rh103 m | 0.935 h | 4.50E-15 | 2.40E-09 | 1.70E-09 | 8.00E-10 | 5.60E-10 | 4.50E-10 | 3.50E-10 |
| Pd109 | 13.4 h | 4.03E-14 | 2.00E-11 | 1.30E-11 | 6.70E-12 | 4.30E-12 | 3.20E-12 | 2.70E-12 |
| Ag112 | 3.12 h | 2.28E-12 | 2.70E-09 | 1.90E-09 | 9.30E-10 | 6.30E-10 | 4.60E-10 | 3.70E-10 |
| Sb129 | 0.173 h | 6.98E-12 | 9.80E-10 | 6.40E-10 | 2.80E-10 | 1.70E-10 | 9.10E-11 | 7.60E-11 |
| Te129 | 1.16 h | 2.16E-13 | 2.00E-09 | 1.40E-09 | 6.80E-10 | 4.40E-10 | 2.90E-10 | 2.30E-10 |
| Te131 | 0.417 h | 1.48E-12 | 3.30E-10 | 2.20E-10 | 9.90E-11 | 6.50E-11 | 4.40E-11 | 3.70E-11 |
| Te131 m | 1.25 j | 5.26E-12 | 2.60E-10 | 1.70E-10 | 8.10E-11 | 5.20E-11 | 3.50E-11 | 2.80E-11 |
| Te132 | 3.26 j | 8.78E-12 | 7.90E-09 | 5.80E-09 | 3.00E-09 | 1.90E-09 | 1.20E-09 | 9.40E-10 |
| I131 vapeur | 8.04 j | 1.35E-12 | 1.60E-08 | 1.30E-08 | 6.40E-09 | 4.00E-09 | 2.60E-09 | 2.00E-09 |
| I132 vapeur | 2.30 h | 7.96E-12 | 1.70E-07 | 1.60E-07 | 9.40E-08 | 4.80E-08 | 3.10E-08 | 2.00E-08 |
| I133 vapeur | 20.8 h | 2.15E-12 | 2.80E-09 | 2.30E-09 | 1.30E-09 | 6.40E-10 | 4.30E-10 | 3.10E-10 |
| I134 vapeur | 0.876 h | 9.11E-12 | 4.50E-08 | 4.10E-08 | 2.10E-08 | 9.70E-09 | 6.30E-09 | 4.00E-09 |
| I135 vapeur | 6.61 h | 5.29E-12 | 8.20E-09 | 6.90E-10 | 3.90E-10 | 2.20E-10 | 1.60E-10 | 1.50E-10 |
| Cs134 | 2.06 a | 5.47E-12 | 9.70E-09 | 8.50E-09 | 4.50E-09 | 2.10E-09 | 1.40E-09 | 9.20E-10 |
| Cs134m | 2.90 h | 9.32E-14 | 1.10E-08 | 7.30E-09 | 5.20E-09 | 5.30E-09 | 6.30E-09 | 6.60E-09 |
| Cs135 | 2.30E6 a | 1.20E-16 | 1.30E-10 | 8.60E-11 | 3.80E-11 | 2.50E-11 | 1.60E-11 | 1.40E-11 |
| Cs135m | 0.883 h | 5.54E-12 | 1.70E-09 | 9.90E-10 | 6.20E-10 | 6.10E-10 | 6.80E-10 | 6.90E-10 |
| Cs136 | 13.1 j | 7.52E-12 | 9.20E-11 | 7.80E-11 | 4.10E-11 | 2.40E-11 | 1.50E-11 | 1.20E-11 |
| Cs137 | 30.0 a | 2.00E-12 | 7.30E-09 | 5.20E-09 | 2.90E-09 | 2.00E-09 | 1.40E-09 | 1.20E-09 |
| Cs138 | 0.536 h | 7.88E-12 | 8.80E-09 | 5.40E-09 | 3.60E-09 | 3.70E-09 | 4.40E-09 | 4.60E-09 |
| Ba139 | 1.38 h | 1.65E-13 | 2.60E-10 | 1.80E-10 | 8.10E-11 | 5.00E-11 | 2.90E-11 | 2.40E-11 |
| Ba140 | 12.7 j | 8.42E-12 | 5.40E-10 | 3.50E-10 | 1.60E-10 | 1.00E-10 | 6.60E-11 | 5.60E-11 |
| La141 | 3.93 h | 1.63E-13 | 2.70E-08 | 2.00E-08 | 1.10E-08 | 7.60E-09 | 6.20E-09 | 5.10E-09 |
| La142 | 1.54 h | 8.86E-12 | 1.40E-09 | 9.30E-10 | 4.30E-10 | 2.80E-10 | 1.80E-10 | 1.50E-10 |
| Ce141 | 32.5 j | 2.66E-13 | 8.10E-10 | 5.70E-10 | 2.70E-10 | 1.70E-10 | 1.10E-10 | 8.90E-11 |
| Ce143 | 1.38 j | 1.00E-12 | 1.40E-08 | 1.10E-08 | 6.30E-09 | 4.60E-09 | 4.10E-09 | 3.20E-09 |
| Pr145 | 5.98 h | 5.62E-14 | 5.60E-09 | 3.90E-09 | 1.90E-09 | 1.30E-09 | 9.30E-10 | 7.50E-10 |
| Nd147 | 11.0 j | 5.00E-13 | 1.60E-09 | 1.10E-09 | 4.90E-10 | 3.20E-10 | 2.00E-10 | 1.70E-10 |
| Nd149 | 1.73 h | 1.36E-12 | 1.20E-08 | 8.60E-09 | 4.90E-09 | 3.50E-09 | 3.00E-09 | 2.40E-09 |
| Pm149 | 2.21 j | 4.07E-14 | 7.10E-10 | 4.80E-10 | 2.30E-10 | 1.50E-10 | 1.10E-10 | 8.90E-11 |
| Pm151 | 1.18 j | 1.13E-12 | 5.30E-09 | 3.60E-09 | 1.80E-09 | 1.20E-09 | 9.00E-10 | 7.30E-10 |
| Sm153 | 1.95 j | 2.24E-13 | 3.40E-09 | 2.60E-09 | 1.30E-09 | 7.90E-10 | 5.70E-10 | 4.60E-10 |
| Sm156 | 9.40 h | 4.21E-13 | 4.20E-09 | 2.90E-09 | 1.50E-09 | 1.00E-09 | 7.90E-10 | 6.30E-10 |
| U237 | 6.75 j | 4.79E-13 | 1.60E-09 | 1.10E-09 | 5.80E-10 | 3.50E-10 | 2.70E-10 | 2.20E-10 |
| Np237 | 2.14E6 a | 8.05E-13 | 7.80E-09 | 5.70E-09 | 3.30E-09 | 2.40E-09 | 2.10E-09 | 1.70E-09 |
| Np239 | 2.36 j | 5.87E-13 | 4.40E-05 | 4.00E-05 | 2.80E-05 | 2.20E-05 | 2.20E-05 | 2.30E-05 |
| Pu238 | 87.7 a | 3.02E-15 | 5.90E-09 | 4.20E-09 | 2.00E-09 | 1.40E-09 | 9.30E-10 | 9.30E-10 |
| Pu239 | 2.41E4 a | 1.32E-15 | 7.80E-05 | 7.40E-05 | 5.60E-05 | 4.40E-05 | 4.30E-05 | 4.60E-05 |
| Pu240 | 6.54E3 a | 2.89E-15 | 8.00E-05 | 7.70E-05 | 6.00E-05 | 4.80E-05 | 4.70E-05 | 5.00E-05 |
| Pu241 | 14.4 a | 1.87E-17 | 8.00E-05 | 7.70E-05 | 6.00E-05 | 4.80E-05 | 4.70E-05 | 5.00E-05 |
| Pu242 | 3.76E5 a | 2.40E-15 | 9.10E-07 | 9.70E-07 | 9.20E-07 | 8.30E-07 | 8.60E-07 | 9.00E-07 |
| Am241 | 432 a | 9.90E-14 | 7.60E-05 | 7.30E-05 | 5.70E-05 | 4.50E-05 | 4.50E-05 | 4.80E-05 |

Tableau 22: Coefficients de dose efficace par ingestion.

| | Coefficient dose efficace - ingestion (Sv.Bq ⁻¹) | | | | | |
|--------------|--|----------|----------|----------|-----------|----------|
| | bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | adulte |
| C14 aérosols | 1.40E-09 | 1.60E-09 | 9.90E-10 | 8.00E-10 | 5.70E-10 | 5.80E-10 |
| Br83 | 5.30E-10 | 3.00E-10 | 1.40E-10 | 8.30E-11 | 5.50E-11 | 4.30E-11 |
| Rb88 | 1.10E-09 | 6.20E-10 | 3.00E-10 | 1.70E-10 | 1.20E-10 | 9.00E-11 |
| Sr91 | 5.20E-09 | 4.00E-09 | 2.10E-09 | 1.20E-09 | 7.40E-10 | 6.50E-10 |
| Sr92 | 3.40E-09 | 2.70E-09 | 1.40E-09 | 8.20E-10 | 4.80E-10 | 4.30E-10 |
| Y91 m | 9.20E-11 | 6.00E-11 | 3.30E-11 | 2.10E-11 | 1.40E-11 | 1.10E-11 |
| Y92 | 5.90E-09 | 3.60E-09 | 1.80E-09 | 1.00E-09 | 6.20E-10 | 4.90E-10 |
| Y93 | 1.40E-08 | 8.50E-09 | 4.30E-09 | 2.50E-09 | 1.40E-09 | 1.20E-09 |
| Zr97 | 2.20E-08 | 1.40E-08 | 7.30E-09 | 4.40E-09 | 2.60E-09 | 2.10E-09 |
| Nb97 | 7.70E-10 | 4.50E-10 | 2.30E-10 | 1.30E-10 | 8.70E-11 | 6.80E-11 |
| Mo99 | 5.50E-09 | 3.50E-09 | 1.80E-09 | 1.10E-09 | 7.60E-10 | 6.00E-10 |
| Tc99 m | 2.00E-10 | 1.30E-10 | 7.20E-11 | 4.30E-11 | 2.80E-11 | 2.20E-11 |
| Ru103 | 7.10E-09 | 4.60E-09 | 2.40E-09 | 1.50E-09 | 9.20E-10 | 7.30E-10 |
| Ru105 | 2.70E-09 | 1.80E-09 | 9.10E-10 | 5.50E-10 | 3.30E-10 | 2.60E-10 |
| Rh105 | 4.00E-09 | 2.70E-09 | 1.30E-09 | 8.00E-10 | 4.60E-10 | 3.70E-10 |
| Rh103 m | 4.70E-11 | 2.70E-11 | 1.30E-11 | 7.40E-12 | 4.80E-12 | 3.80E-12 |
| Pd109 | 6.30E-09 | 4.10E-09 | 2.00E-09 | 1.20E-09 | 6.80E-10 | 5.50E-10 |
| Ag112 | 4.90E-09 | 3.00E-09 | 1.50E-09 | 8.90E-10 | 5.40E-10 | 4.30E-10 |
| Sb129 | 4.30E-09 | 2.80E-09 | 1.50E-09 | 8.80E-10 | 5.30E-10 | 4.20E-10 |
| Tel29 | 7.50E-10 | 4.40E-10 | 2.10E-10 | 1.20E-10 | 8.00E-11 | 6.30E-11 |
| Tel31 | 9.00E-10 | 6.60E-10 | 3.50E-10 | 1.90E-10 | 1.20E-10 | 8.70E-11 |
| Tel31 m | 2.00E-08 | 1.40E-08 | 7.80E-09 | 4.30E-09 | 2.70E-09 | 1.90E-09 |
| Tel32 | 4.80E-08 | 3.00E-08 | 1.60E-08 | 8.30E-09 | 5.30E-09 | 3.80E-09 |
| I131 vapeur | 1.80E-07 | 1.80E-07 | 1.00E-07 | 5.20E-08 | 3.40E-08 | 2.20E-08 |
| I132 vapeur | 3.00E-09 | 2.40E-09 | 1.30E-09 | 6.20E-10 | 4.10E-10 | 2.90E-10 |
| I133 vapeur | 4.90E-08 | 4.40E-08 | 2.30E-08 | 1.00E-08 | 6.80E-09 | 4.30E-09 |
| I134 vapeur | 1.10E-09 | 7.50E-10 | 3.90E-10 | 2.10E-10 | 1.40E-10 | 1.10E-10 |
| I135 vapeur | 1.00E-08 | 8.90E-09 | 4.70E-09 | 2.20E-09 | 1.40E-09 | 9.30E-10 |
| Cs134 | 2.60E-08 | 1.60E-08 | 1.30E-08 | 1.40E-08 | 1.90E-08 | 1.90E-08 |
| Cs134m | 2.10E-10 | 1.20E-10 | 5.90E-11 | 3.50E-11 | 2.50E-11 | 2.00E-11 |
| Cs135 | 4.10E-09 | 2.30E-09 | 1.70E-09 | 1.70E-09 | 2.00E-09 | 2.00E-09 |
| Cs135m | 1.30E-10 | 8.60E-11 | 4.90E-11 | 3.20E-11 | 2.30E-11 | 1.90E-11 |
| Cs136 | 1.50E-08 | 9.50E-09 | 6.10E-09 | 4.40E-09 | 3.40E-09 | 3.00E-09 |
| Cs137 | 2.10E-08 | 1.20E-08 | 9.60E-09 | 1.00E-08 | 1.30E-08 | 1.30E-08 |
| Cs138 | 1.10E-09 | 5.90E-10 | 2.90E-10 | 1.70E-10 | 1.20E-10 | 9.20E-11 |
| Ba139 | 1.40E-09 | 8.40E-10 | 4.10E-10 | 2.40E-10 | 1.50E-10 | 1.20E-10 |
| Ba140 | 3.20E-08 | 1.80E-08 | 9.20E-09 | 5.80E-09 | 3.70E-09 | 2.60E-09 |
| La141 | 4.30E-09 | 2.60E-09 | 1.30E-09 | 7.60E-10 | 4.50E-10 | 3.60E-10 |
| La142 | 1.90E-09 | 1.10E-09 | 5.80E-10 | 3.50E-10 | 2.30E-10 | 1.80E-10 |
| Ce141 | 8.10E-09 | 5.10E-09 | 2.60E-09 | 1.50E-09 | 8.80E-10 | 7.10E-10 |
| Ce143 | 1.20E-08 | 8.00E-09 | 4.10E-09 | 2.40E-09 | 1.40E-09 | 1.10E-09 |
| Pr145 | 4.70E-09 | 2.90E-09 | 1.40E-09 | 8.50E-10 | 4.90E-10 | 3.90E-10 |
| Nd147 | 1.20E-08 | 7.80E-09 | 3.90E-09 | 2.30E-09 | 1.30E-09 | 1.10E-09 |
| Nd149 | 1.40E-09 | 8.70E-10 | 4.30E-10 | 2.60E-10 | 1.60E-10 | 1.20E-10 |
| Pm149 | 1.20E-08 | 7.40E-09 | 3.70E-09 | 2.20E-09 | 1.20E-09 | 9.90E-10 |
| Pm151 | 8.00E-09 | 5.10E-09 | 2.60E-09 | 1.60E-09 | 9.10E-10 | 7.30E-10 |
| Sm153 | 8.40E-09 | 5.40E-09 | 2.70E-09 | 1.60E-09 | 9.20E-10 | 7.40E-10 |
| Sm156 | 2.80E-09 | 1.80E-09 | 9.00E-10 | 5.40E-10 | 3.10E-10 | 2.50E-10 |
| U237 | 8.30E-09 | 5.40E-09 | 2.80E-09 | 1.60E-09 | 9.50E-10 | 7.60E-10 |
| Np237 | 2.00E-06 | 2.10E-07 | 1.40E-07 | 1.10E-07 | 1.10E-07 | 1.10E-07 |
| Np239 | 8.90E-09 | 5.70E-09 | 2.90E-09 | 1.70E-09 | 1.00E-09 | 8.00E-10 |
| Pu238 | 4.00E-06 | 4.00E-07 | 3.10E-07 | 2.40E-07 | 2.20E-07 | 2.30E-07 |
| Pu239 | 4.20E-06 | 4.20E-07 | 3.30E-07 | 2.70E-07 | 2.40E-07 | 2.50E-07 |
| Pu240 | 4.20E-06 | 4.20E-07 | 3.30E-07 | 2.70E-07 | 2.40E-07 | 2.50E-07 |
| Pu241 | 5.60E-08 | 5.70E-09 | 5.50E-09 | 5.10E-09 | 4.80E-09 | 4.80E-09 |
| Pu242 | 4.00E-06 | 4.00E-07 | 3.20E-07 | 2.60E-07 | 2.30E-07 | 2.40E-07 |
| Am241 | 3.70E-06 | 3.70E-07 | 2.70E-07 | 2.20E-07 | 2.00E-07 | 2.00E-07 |

Tableau 23: Coefficients de dose à la thyroïde par inhalation.

| | Période | Cd dépôt (efficace) | Coefficient dose à la thyroïde par inhalation - (Sv.Bq ⁻¹) | | | | | |
|---------|-----------|-----------------------------|--|----------|----------|----------|-----------|----------|
| | | (Sv/h)/(Bq/m ²) | bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | adulte |
| Te121 m | 154 j | 7.56E-13 | 7.70E-09 | 5.70E-09 | 3.10E-09 | 1.60E-09 | 1.10E-09 | 8.70E-10 |
| Te123 | 1.00E13 a | 7.02E-14 | 1.00E-09 | 7.80E-10 | 4.50E-10 | 2.70E-10 | 2.20E-10 | 2.00E-10 |
| Te123 m | 120 j | 5.15E-13 | 5.50E-09 | 3.90E-09 | 1.90E-09 | 8.90E-10 | 5.80E-10 | 4.10E-10 |
| Te125 m | 58.0 j | 1.30E-13 | 4.40E-09 | 3.00E-09 | 1.40E-09 | 6.20E-10 | 3.90E-10 | 2.50E-10 |
| Te127 | 9.35 h | 1.86E-14 | 5.90E-11 | 3.40E-11 | 1.50E-11 | 7.10E-12 | 4.10E-12 | 2.80E-12 |
| Te127 m | 109 j | 5.89E-14 | 1.40E-08 | 9.80E-09 | 4.70E-09 | 2.00E-09 | 1.30E-09 | 8.60E-10 |
| Te129 | 1.16 h | 2.16E-13 | 4.50E-12 | 2.80E-12 | 1.30E-12 | 7.40E-13 | 4.40E-13 | 3.50E-13 |
| Te129 m | 33.6 j | 2.77E-13 | 1.90E-08 | 1.20E-08 | 5.70E-09 | 2.50E-09 | 1.50E-09 | 1.00E-09 |
| Te131 | 0.417 h | 1.48E-12 | 6.80E-10 | 4.60E-10 | 2.40E-10 | 1.20E-10 | 7.30E-11 | 4.80E-11 |
| Te131 m | 1.25 j | 5.26E-12 | 3.70E-08 | 2.50E-08 | 1.30E-08 | 6.60E-09 | 4.10E-09 | 2.70E-09 |
| Te132 | 3.26 j | 8.78E-12 | 8.70E-08 | 5.30E-08 | 2.40E-08 | 1.10E-08 | 6.60E-09 | 4.30E-09 |
| Te133 | 0.207 h | 3.22E-12 | 7.30E-10 | 4.50E-10 | 2.10E-10 | 9.40E-11 | 5.00E-11 | 3.60E-11 |
| Te133 m | 0.923 h | 8.41E-12 | 3.30E-09 | 2.00E-09 | 9.40E-10 | 4.20E-10 | 2.50E-10 | 1.60E-10 |
| Te134 | 0.696 h | 3.12E-12 | 3.80E-10 | 2.80E-10 | 1.30E-10 | 6.10E-11 | 3.80E-11 | 2.60E-11 |
| I121 | 2.12 h | 1.47E-12 | 3.80E-09 | 8.40E-09 | 4.90E-09 | 2.60E-09 | 1.80E-09 | 1.20E-09 |
| I123 | 13.2 h | 5.98E-13 | 3.90E-08 | 3.50E-08 | 1.90E-08 | 8.60E-09 | 5.70E-09 | 3.70E-09 |
| I125 | 60.1 j | 1.54E-13 | 9.30E-07 | 1.00E-06 | 7.50E-07 | 5.60E-07 | 4.00E-07 | 2.70E-07 |
| I128 | 0.416 h | 3.16E-13 | 1.90E-09 | 1.70E-09 | 8.60E-10 | 3.70E-10 | 2.40E-10 | 1.50E-10 |
| I129 | 1.57E7 a | 9.29E-14 | 3.30E-06 | 3.90E-06 | 3.10E-06 | 3.40E-06 | 2.50E-06 | 1.90E-06 |
| I130 | 12.4 h | 7.56E-12 | 3.60E-07 | 3.30E-07 | 1.70E-07 | 8.00E-08 | 5.20E-08 | 3.30E-08 |
| I131 | 8.04 j | 1.35E-12 | 3.30E-06 | 3.20E-06 | 1.90E-06 | 1.10E-07 | 6.20E-07 | 3.90E-07 |
| I132 | 2.30 h | 7.96E-12 | 4.30E-08 | 3.80E-08 | 2.00E-08 | 8.90E-09 | 5.80E-09 | 3.60E-09 |
| I132 m | 1.39 h | 1.13E-12 | 3.90E-08 | 3.50E-08 | 1.80E-08 | 8.20E-09 | 5.30E-09 | 1.30E-09 |
| I133 | 20.8 h | 2.15E-12 | 8.90E-07 | 8.00E-07 | 4.20E-07 | 1.90E-07 | 1.20E-07 | 7.60E-08 |
| I134 | 0.876 h | 9.11E-12 | 8.20E-09 | 7.30E-09 | 3.80E-09 | 1.70E-09 | 1.10E-09 | 7.00E-10 |
| I135 | 6.61 h | 5.29E-12 | 1.80E-07 | 1.60E-07 | 8.00E-09 | 3.80E-08 | 2.40E-08 | 1.50E-08 |

Tableau 24: Coefficients de dose à la thyroïde par ingestion.

| | Coefficient dose à la thyroïde par ingestion (Sv.Bq ⁻¹) | | | | | |
|---------|---|----------|----------|----------|-----------|----------|
| | bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | adulte |
| Te121 | 3.80E-09 | 1.70E-09 | 9.70E-10 | 5.30E-10 | 3.80E-10 | 2.80E-10 |
| Te121 m | 3.00E-08 | 1.30E-08 | 7.30E-09 | 3.60E-09 | 2.50E-09 | 1.80E-09 |
| Te123 | 4.00E-09 | 1.80E-09 | 1.10E-09 | 7.10E-10 | 5.80E-10 | 4.90E-10 |
| Te123 m | 2.70E-08 | 1.20E-08 | 6.40E-09 | 2.90E-09 | 1.90E-09 | 1.20E-09 |
| Te125 m | 2.50E-08 | 1.10E-08 | 5.80E-09 | 2.60E-09 | 1.60E-09 | 1.00E-09 |
| Te127 | 4.50E-10 | 1.70E-10 | 8.90E-11 | 4.10E-11 | 2.60E-11 | 1.70E-11 |
| Te127 m | 7.60E-08 | 3.40E-08 | 1.80E-08 | 7.70E-09 | 4.90E-09 | 3.10E-09 |
| Te129 | 2.40E-11 | 6.30E-12 | 3.10E-12 | 1.70E-12 | 1.00E-12 | 7.50E-13 |
| Te129 m | 1.10E-07 | 5.10E-08 | 2.60E-08 | 1.10E-08 | 7.40E-09 | 4.60E-09 |
| Te131 | 7.60E-09 | 7.30E-09 | 4.30E-09 | 2.10E-09 | 1.40E-09 | 8.90E-10 |
| Te131 m | 2.60E-07 | 1.50E-07 | 8.90E-08 | 4.50E-08 | 2.90E-08 | 1.80E-08 |
| Te132 | 6.50E-07 | 3.20E-07 | 1.70E-07 | 7.50E-08 | 1.49E-07 | 3.10E-08 |
| Te133 | 9.50E-09 | 8.50E-09 | 4.50E-09 | 2.00E-09 | 1.30E-09 | 8.10E-10 |
| Te133 m | 3.90E-08 | 3.40E-08 | 1.80E-08 | 8.00E-09 | 5.10E-09 | 3.20E-09 |
| Te134 | 6.30E-09 | 5.50E-09 | 2.90E-09 | 1.30E-09 | 8.30E-10 | 5.20E-10 |
| I121 | 8.80E-09 | 8.30E-09 | 4.90E-09 | 2.60E-09 | 1.80E-09 | 1.20E-09 |
| I123 | 4.10E-08 | 3.70E-08 | 2.00E-08 | 9.20E-09 | 6.10E-09 | 3.90E-09 |
| I125 | 1.00E-06 | 1.10E-06 | 8.20E-07 | 6.20E-07 | 4.40E-07 | 3.00E-07 |
| I128 | 1.10E-09 | 1.00E-09 | 5.10E-10 | 2.20E-10 | 1.40E-10 | 8.90E-11 |
| I129 | 3.70E-06 | 4.30E-06 | 3.40E-06 | 3.80E-06 | 2.80E-06 | 2.10E-06 |
| I130 | 3.90E-07 | 3.50E-07 | 1.90E-07 | 8.50E-08 | 5.60E-08 | 3.60E-08 |
| I131 | 3.70E-06 | 3.60E-06 | 2.10E-06 | 1.00E-06 | 6.80E-07 | 4.30E-07 |
| I132 | 4.00E-08 | 3.50E-08 | 1.90E-08 | 8.30E-09 | 5.40E-09 | 3.40E-09 |
| I132 m | 3.80E-08 | 3.40E-08 | 1.80E-08 | 8.00E-09 | 5.20E-09 | 3.30E-09 |
| I133 | 9.60E-07 | 8.60E-07 | 4.60E-07 | 2.00E-07 | 1.30E-07 | 8.20E-08 |
| I134 | 6.30E-09 | 5.60E-09 | 2.90E-09 | 1.30E-09 | 8.50E-10 | 5.40E-10 |
| I135 | 1.90E-07 | 1.70E-07 | 8.70E-08 | 3.90E-08 | 2.50E-08 | 1.60E-08 |

XII - REFERENCES

Base de données JEFF - Joint Evaluation Fission and Fusion File – AEN – février 2005.

Arrêté du 01/09/2003 pour le calcul des doses efficaces définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.

Directive Euratom 96-29 - Nouvelle directive fixant les normes de base n°96/29/Euratom du 13/05/96 – Journal Officiel de la Communauté Européenne L159 du 29 juin 1996.

CIPR 71: Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients; Volume 25, n° 3-4, 1995 / CIPR 72: Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients.

ICRP Publication 66: Human respiratory tract model for radiological protection – 1993.

External Exposure to Radionuclides in air, water and soil - Federal Guidance Report N° 12, 1993.

Enquête alimentation de Tureia – Note 779/CEP/SMCB, août 1967.

I.4. Calcul de l'impact radiologique des essais nucléaires atmosphériques réalisés sur les sites de Polynésie française

I INTRODUCTION

L'objet de ce document est de présenter la méthodologie utilisée en 2005 et 2006 par le CEA pour réévaluer l'impact dosimétrique, sur la population des îles de Polynésie Française, des retombées de différents essais atmosphériques : ALDEBARAN, RIGEL, ARCTURUS, ENCELADE, PHOEBE et CENTAURE, réalisés entre 1966 et 1974.

Toutes les voies d'atteinte sont considérées : l'inhalation (doses efficaces et doses à la thyroïde), l'irradiation externe (doses efficaces par le panache et les dépôts) et l'ingestion (doses efficaces et doses à la thyroïde).

II - METHODOLOGIE DE CALCUL DE L'IMPACT SANITAIRE DES ESSAIS NUCLEAIRES AERIENS

II.1 - METHODE DE CALCUL

L'impact environnemental et sanitaire des retombées des essais nucléaires aériens est estimé par le calcul des doses potentiellement reçues par le public suite à ces essais. Pour cela, on utilise les mesures d'activités dans l'environnement et sur des échantillons biologiques disponibles, exprimées par isotope ou en β global, notamment dans de l'eau prélevée dans des citernes, dans des légumes, des poissons, de la viande, des mollusques, ainsi que des mesures de dépôt au sol ou dans de l'eau de pluie. Ces mesures servent aux calculs de doses efficaces par irradiation externe, inhalation et ingestion.

Dans la méthodologie mise en œuvre, les calculs d'impact à long terme, prenant en compte la remise en suspension des dépôts, n'ont pas été réalisés.

L'activité de chaque radionucléide dans les différents milieux est calculée au cours du temps à l'aide des données de la base JEFF, version 3.1. Sur les 1300 isotopes présents initialement dans le terme source, environ 1000 sont des isotopes radioactifs. Après la décroissance pendant le transfert jusqu'aux lieux de retombées (délai variant entre 6 et 48 heures pour les essais et les lieux de retombées étudiés jusqu'à présent), moins de 100 isotopes contribuent majoritairement à l'activité globale.

Quand les résultats de mesures sont exprimés en β global, la répartition des radionucléides dans le dépôt ou dans les échantillons prélevés est déduite du terme source calculé par le CEA/DAM, en prenant en compte la décroissance radioactive et les filiations de chaque radionucléide du terme source et en supposant que le transport atmosphérique n'a provoqué aucune discrimination physico-chimique entre les radionucléides.

La répartition des radionucléides dans les différents milieux est obtenue à partir du calcul du terme source réalisé par le CEA/DAM et de son évolution dans le temps. Faute d'informations sur les transferts des radionucléides vers la chaîne alimentaire, on suppose que la répartition calculée à partir du terme source reste valable dans les échantillons.

Par la suite, pour chaque isotope présent sous forme d'aérosol dans le panache, l'activité volumique intégrée sur le temps de la retombée, c'est-à-dire sur le temps de passage du panache, exprimée en $\text{Bq}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$, est déduite du dépôt au sol, exprimé en $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, à partir de la vitesse de dépôt V_d , en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$\text{Act vol intégrée} = \frac{\text{Dépôt}}{V_d}$$

Pour cette évaluation, on a considéré plusieurs valeurs possibles de vitesse de dépôt, variant entre 10^{-3} et $3 \cdot 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$, selon la présence ou non de pluie et le délai d'arrivée du panache sur les lieux de retombées. Une vitesse de dépôt faible conduit aux activités dans l'air les plus élevées, et une évaluation maximale de la dose due à l'irradiation externe par le panache et de la dose par inhalation. Les valeurs de vitesse de dépôt les plus élevées sont utilisées lorsque l'essai ou les retombées se produisent par temps de pluie, notamment lorsque le temps de transfert est peu important. En effet, si la retombée se produit tardivement, les plus grosses particules émises se sont déposées en amont du lieu de retombée étudié.

Par exemple, compte tenu du temps d'arrivée du nuage sur Tahiti lors de l'essai CENTAURE et comme il a plu lors du passage du nuage sur Tahiti, sur le plateau et au sud-ouest de l'île, une vitesse de dépôt de 10^{-2} m.s^{-1} a été utilisée à ces endroits.

Des valeurs comprises entre 10^{-3} et 10^{-1} m.s^{-1} sont utilisées lorsque le panache radioactif est arrivé moins d'une journée après l'essai sur le lieu de retombée.

L'activité des gaz rares, qui sert uniquement au calcul de la dose par irradiation externe par le panache, est déduite de l'activité des aérosols à l'aide des ratios de leurs activités respectives par rapport à l'activité totale dans le panache à l'instant de calcul considéré.

II.1.1 - DOSES PAR INHALATION

Méthode employée

La dose par inhalation due à l'ensemble des isotopes, exprimée en Sv, est égale à la somme des produits de l'activité volumique intégrée sur le temps de passage du panache pour chaque isotope par le débit respiratoire QR_j , exprimé en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, fonction de l'âge de la personne, et du coefficient de dose, soit efficace, soit à la thyroïde, $CD \text{ inhal}_{i,j}$, qui s'exprime en $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ inhalé, et est fonction de l'isotope et de sa forme physico-chimique ainsi que de l'âge de la personne :

$$\text{Dose inhal}_j = \sum_i (\text{Act vol intégrée}_i \times QR_j \times CD \text{ inhal}_{i,j})$$

Les gaz rares ne contribuent pas à la dose par inhalation.

Résultats

Les résultats sont exprimés en termes de dose efficace, due à l'ensemble des isotopes du terme source, ainsi que de dose à la thyroïde, essentiellement due aux iodes et, en moindre part, aux tellures.

Hypothèses particulières

Pour les calculs de doses internes, différentes classes d'âge ont été retenues, du bébé à l'adulte.

Lorsque les retombées se sont produites durant la nuit, la dose par inhalation, efficace ou à la thyroïde, est calculée en supposant que l'individu exposé se trouve à l'intérieur de son

habitation pendant le passage du panache. L'activité volumique à l'intérieur d'une habitation est supposée égale à la moitié de l'activité volumique à l'extérieur.

Lorsque la population se trouvait dans les abris au moment des retombées, on a supposé que l'activité à l'intérieur des abris est égale au dixième de l'activité volumique à l'extérieur.

II.1.2 - DOSES EFFICACES PAR IRRADIATION EXTERNE

Ces doses sont identiques quel que soit l'âge de l'individu.

II.1.2.1 - IRRADIATION EXTERNE PAR LE PANACHE

Méthode employée

La dose efficace due à l'irradiation externe par le panache, exprimée en Sv, est égale à la somme des produits de l'activité volumique intégrée de chaque isotope présent dans le panache, par le coefficient de dose efficace pour la voie "irradiation externe par le panache", CD_{pch_i} , qui s'exprime en $Sv/(Bq.s.m^{-3})$ et est fonction de l'isotope :

$$\text{Dose externe panache} = \sum_i (\text{Act vol intégrée}_i * CD_{pch_i})$$

Hypothèses particulières

Lorsque les retombées se sont produites durant la nuit, la dose par irradiation par le panache est calculée pour un individu présent dans son habitation. L'activité volumique à l'intérieur d'une habitation est supposée égale à la moitié de l'activité volumique à l'extérieur.

Lorsque la population se trouvait dans les abris au moment des retombées, on a considéré que les abris apportaient un coefficient de protection de 0,5 vis-à-vis des rayonnements.

II.1.2.2 - IRRADIATION EXTERNE PAR LES DEPOTS

Méthode employée

Connaissant les activités déposées pour les différents isotopes, on peut en déduire, dans un premier temps, le débit de dose dû au dépôt. Celui-ci, exprimé en $Sv.h^{-1}$, est égal à la somme des produits du dépôt par isotope par le coefficient de dose efficace, pour la voie "irradiation externe par le dépôt", $CD_{dépôt_i}$, qui s'exprime en $(Sv.h^{-1})/(Bq.m^{-2})$, et est fonction de l'isotope :

$$\text{Débit de dose externe dépôt} = \sum_i (\text{Dépôt}_i \times CD_{dépôt_i})$$

Puis, par intégration pour différentes durées d'exposition, on évalue la dose due au dépôt, en prenant en compte la décroissance radioactive de l'isotope, caractérisé par sa constante radioactive λ_{rad_i} . Cette dose évolue au cours du temps, selon la durée de présence T de l'individu considéré sur le dépôt. Cette dose perdure au-delà du passage du panache.

$$\text{Dose externe dépôt} = \sum_i \left(\frac{\text{Débit de dose dépôt}_i [1 - \exp(-\lambda_{rad_i} T)]}{\lambda_{rad_i}} \right)$$

Hypothèses particulières

Dans le calcul de la dose intégrée due au dépôt, on considère un coefficient d'atténuation, prenant en compte le fait que les individus concernés passent une partie du temps à l'intérieur des habitations et se déplacent. On suppose que les personnes passaient 2/3 du temps à l'extérieur, quelle que soit la durée d'exposition.

Lorsque les retombées se sont produites durant la nuit, on a supposé que la dose due au dépôt est nulle pendant les 6 premières heures, car les personnes étaient à l'intérieur de leurs habitations pendant la nuit.

II.1.3 - DOSES PAR INGESTION

Cette dose est due à la consommation d'aliments produits localement, contaminés par les retombées radioactives. Cette dose est fonction de l'âge de l'individu ; elle dépend donc de sa consommation.

Méthode employée

Les calculs de dose par ingestion se font à partir des activités en β global mesurées dans les aliments d'origine locale effectivement consommés⁶. Faute d'informations sur les transferts des radionucléides vers les différents milieux, la répartition des activités des isotopes dans les différents aliments à la date considérée est supposée identique à la répartition des activités dans le dépôt, calculée à partir de l'évolution dans le temps du terme source.

Lorsqu'on connaît l'activité par isotope dans l'aliment considéré, soit par mesure, soit après calcul, exprimée en Bq.kg^{-1} , la dose par ingestion se calcule par la somme, sur les différents isotopes, des produits de l'activité en Bq.kg^{-1} , par la consommation, en kg et le coefficient de dose par ingestion, $\text{CD}_{\text{ing } i,j}$, soit efficace, soit à la thyroïde, qui s'exprime en Sv par Bq ingéré :

$$\text{Dose ingestion}_{i,j} = \sum_i (\text{Act aliment }_i \times \text{conso }_j \times \text{CD ingestion }_{i,j})$$

Dans le cas particulier des légumes feuilles, l'activité (Bq.kg^{-1}) de chaque radionucléide due aux dépôts directs pendant le passage du panache peut être estimée à partir de l'activité déposée au sol, du rapport de captation (RC, sans unité) des légumes feuilles vis-à-vis du dépôt au sol et du rendement de culture (kg.m^{-2}).

L'activité des légumes feuilles, exprimée en Bq d'isotope par kg suite aux "dépôts directs" est égale à :

$$\text{Activité aliment }_i = \text{Dépôt}_i \times \frac{\text{RC}}{\text{Rdt}}$$

L'activité intégrée sur le temps des légumes feuilles (Bq.jour.kg^{-1}) se déduit de l'activité précédente par intégration en supposant une décroissance biologique et radioactive ; la

⁶ Par exemple, comme les habitants de Taku ont été regroupés à Rikitea lors de l'essai Phoebe, on a considéré qu'ils ont bu de l'eau de Rikitea, moins contaminée.

constante de décroissance efficace λ_{eff} , exprimée en jour^{-1} , prise en compte est la somme des constantes radioactive et biologique.

$$\text{Activité intégrée aliment } i = \frac{\text{Activité aliment } i}{\lambda_{\text{eff } i}}$$

La dose par ingestion est alors égale au produit de cette activité par la consommation journalière, en kg.j^{-1} , et du coefficient de dose, soit efficace, soit à la thyroïde, exprimé en Sv.Bq^{-1} :

$$\text{Dose ingestion}_{j,j} = \sum_i \text{Activité intégrée aliment } i \times \text{conso}_j \times \text{CD ingestion } i,j$$

Résultats

Comme pour les doses par inhalation, les résultats sont exprimés en termes de dose efficace, due à l'ensemble des isotopes du terme source, ainsi que de dose à la thyroïde, essentiellement due aux iodes et, en moindre part, aux tellures.

Hypothèses particulières

L'activité des végétaux est supposée évoluer selon la décroissance radioactive à partir du début de la consommation.

Lorsque les mesures dans les aliments étaient tardives, on a recalculé l'activité des aliments à des temps plus proches de l'instant de la retombée, afin de prendre en compte le fait que les populations ont pu consommer des aliments potentiellement contaminés. Pour cela, on a supposé que la répartition de l'activité des différents isotopes est identique entre le terme source et les aliments aux différents instants.

Faute d'informations précises sur l'activité de l'eau et les transferts des différents isotopes aux mollusques, on suppose que le rapport des activités dans le dépôt et les mollusques est identique. Par la suite, on suppose que l'activité dans les mollusques évolue selon la décroissance radioactive pendant 1 mois.

Lorsqu'aucune mesure dans les eaux de boisson n'est disponible mais que l'activité de l'eau de pluie est connue, on a déduit l'activité dans l'eau de boisson consommée, par exemple aux îles Gambier, au moyen des rapports entre l'activité dans l'eau de pluie et l'activité dans les eaux de boisson déterminés pour les essais ENCELADE et ARCTURUS.

II.2 - ORIGINE DES DONNEES

II.2.1 - RAPPORT DE CAPTATION

Le rapport de captation (RC) des légumes feuilles est pris égal à 0,1.

II.2.2 - PERIODES BIOLOGIQUES

Les périodes biologiques d'élimination dans les végétaux sont égales à 30 jours, sauf pour l'iode 131, pour lequel une période de 5 jours est prise en compte.

II.2.3 - RENDEMENT DES LEGUMES FEUILLES

Le rendement des légumes feuilles est de 1 kg.m^{-2} .

II.2.4 - COEFFICIENTS DE DOSE

II.2.4.1 - DOSES INTERNES

Pour le calcul des doses efficaces internes, par inhalation et par ingestion, les coefficients de dose proviennent de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003. Ils sont rappelés dans le Tableau 9 et le Tableau 10, pour quelques isotopes qui, dans le cas des essais déjà étudiés, contribuent de manière significative aux conséquences.

Dans le cas des doses par inhalation, la forme physico-chimique associée aux différents isotopes est celle recommandée, soit par ce même arrêté, soit par la Directive Européenne, soit par la CIPR 71-72 Pour la voie inhalation, l'iode est supposé émis sous forme vapeur.

En ce qui concerne les doses à la thyroïde, les coefficients de dose proviennent de la CIPR 71-72. Pour la voie inhalation, les coefficients de dose correspondent à une granulométrie des aérosols de 1 µm, valeur habituellement utilisée pour les calculs de dose au public. Les coefficients de dose à la thyroïde figurent dans le Tableau 11 et le Table 12 pour quelques isotopes qui, dans le cas des essais déjà étudiés, contribuent de manière significative aux conséquences.

Les débits respiratoires proviennent de la CIPR 66. Ils dépendent de l'âge de la personne et de son activité.

Dans le tableau suivant, les débits respiratoires correspondent à une phase d'éveil :

Tableau 1: Débits respiratoires utilisés pour les différentes classes d'âge (m³.s⁻¹).

| Classe d'âge | Bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Débit respiratoire (m ³ .s ⁻¹) | 3,31. 10 ⁻⁵ | 5,97. 10 ⁻⁵ | 1,01. 10 ⁻⁴ | 1,77. 10 ⁻⁴ | 2,33. 10 ⁻⁴ | 2,57. 10 ⁻⁴ |

Lorsque le panache est arrivé de nuit sur le lieu de retombée, les débits respiratoires sont plus faibles :

Tableau 2: Débits respiratoires utilisés pour les différentes classes d'âge (m³.s⁻¹).

| Classe d'âge | Bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Débit respiratoire (m ³ .s ⁻¹) | 2,50. 10 ⁻⁵ | 4,17. 10 ⁻⁵ | 6,67. 10 ⁻⁵ | 8,61. 10 ⁻⁵ | 1,17. 10 ⁻⁴ | 1,25. 10 ⁻⁴ |

II.2.4.2 - DOSES EFFICACES EXTERNES

Pour la voie irradiation externe par le panache et les dépôts, les coefficients de dose proviennent du rapport Federal Guidance n°12. Les coefficients de dose due au dépôt sont rappelés dans le Tableau 9.

II.2.5 - RATION ALIMENTAIRE

Selon les lieux de retombées et les caractéristiques des populations, les rations alimentaires sont différentes.

Dans les documents de base, la ration alimentaire n'est disponible que pour des adultes (cf. Tableau 3, Tableau 5, Tableau 7). Pour les autres classes d'âge, on a évalué une consommation fonction de l'âge, qui est indiquée dans le Tablelau 4, le Tableau 6 et Tableau 8 selon le lieu des retombées.

II.2.5.1 - A TUREIA

Tableau 3: Rations alimentaires considérées pour les adultes de Tureia (g.j⁻¹).

| Catégorie | Aliment | Tureia | |
|------------------------------|--------------------|-------------|---------------|
| | | Quantité | |
| | | par aliment | par catégorie |
| boisson | eau | 1000 | |
| | eau de citerne | | |
| | eau de coco | 2000 | |
| | lait | | |
| poissons | thon | | 470 |
| | bonite | | |
| | ature | | |
| | inaa | | |
| viandes | poissons haute mer | 30 | |
| | poissons lagon | 440 | |
| mollusques | poulet | 10 | 30 |
| | porc | 10 | |
| | bœuf | | |
| | chien | 10 | |
| crustacés | turbo | 60 | 190 |
| | bénitier | 100 | |
| | poulpe | 30 | |
| | autres mollusques | | |
| coprah | chevrettes | | 20 |
| | langouste | 20 | |
| coprah | | 220 | 220 |
| fruits plantes arborescentes | banane | 50 | 170 |
| | papaye | 60 | |
| | citron | | |
| | mangue | | |
| | avocat | | |
| | pamplemousse | | |
| | uru | 60 | |
| | autres fruits | | |
| fruits plantes herbacées | ananas | | |
| | tomates | | |
| | concombre | | |
| | aubergine | | |
| | autres fruits | | |
| légumes feuilles | salade | | |
| | chou | | |
| | poireau | | |
| | fafa | | |
| | autres légumes | | |
| racines et tubercules | taro | | |
| | patate douce | | |
| | tarua | | |
| | navet | | |
| | carotte | | |
| | manioc | | |
| | autres | | |
| total origine locale | | | 1100 |

Tableau 4: Consommation en fonction de l'âge à Tureia.

| Aliment | Conso | Classe d'âge | | | | | |
|-------------|--------------------|--------------|-------------|--------------------|------|-------------|--------------------|
| | | nourrisson | | Aliment | | Conso | |
| Eau | l.j ⁻¹ | 0,30 | Eau | l.j ⁻¹ | 0,30 | Eau | l.j ⁻¹ |
| Eau de coco | l.j ⁻¹ | 0,60 | Eau de coco | l.j ⁻¹ | 0,60 | Eau de coco | l.j ⁻¹ |
| Papaye | kg.j ⁻¹ | - | Papaye | kg.j ⁻¹ | - | Papaye | kg.j ⁻¹ |
| Coprah | kg.j ⁻¹ | - | Coprah | kg.j ⁻¹ | - | Coprah | kg.j ⁻¹ |
| Poisson | kg.j ⁻¹ | - | Poisson | kg.j ⁻¹ | - | Poisson | kg.j ⁻¹ |
| Mollusques | kg.j ⁻¹ | - | Mollusques | kg.j ⁻¹ | - | Mollusques | kg.j ⁻¹ |

II.2.5.2 - AUX GAMBIE

Tableau 5: Rations alimentaires considérées pour les adultes aux Gambier (g.j⁻¹).

| Catégorie | Aliment | Gambier | |
|------------------------------|--------------------|-------------|---------------|
| | | Quantité | |
| | | par aliment | par catégorie |
| boisson | eau | | |
| | eau de citerne | 2000 | |
| | eau de coco | 1000 | |
| | lait | | |
| poissons | thon | | |
| | bonite | | |
| | ature | | |
| | inaa | | |
| | poissons haute mer | 80 | 380 |
| | poissons lagon | 300 | |
| viandes | poulet | 40 | |
| | porc | 40 | 80 |
| | bœuf | | |
| | chien | | |
| mollusques | turbo | 15 | |
| | bénitier | 30 | |
| | poulpe | | |
| | autres mollusques | 15 | 60 |
| crustacés | chevrettes | | |
| | langouste | 40 | 40 |
| coprah | | 150 | 150 |
| fruits plantes arborescentes | banane | 100 | |
| | papaye | 50 | |
| | citron | | |
| | mangue | | |
| | avocat | | |
| | pamplemousse | | |
| | uru | 100 | |
| autres fruits | 50 | 300 | |
| fruits plantes herbacées | ananas | | |
| | tomates | 40 | |
| | concombre | 40 | |
| | aubergine | | |
| | autres fruits | 20 | 100 |
| légumes feuilles | salade | 30 | |
| | chou | 10 | |
| | poireau | | |
| | fafa | 30 | |

| Catégorie | Aliment | Gambier | |
|-----------------------|-----------------------------|-------------|---------------|
| | | Quantité | |
| | | par aliment | par catégorie |
| | autres légumes | | 70 |
| racines et tubercules | taro | 70 | |
| | patate douce | 70 | |
| | tarua | | |
| | navet | | |
| | carotte | | |
| | manioc | 100 | |
| | autres | | 240 |
| | total origine locale | | 1420 |

Tableau 6: Consommation en fonction de l'âge aux Gambier (kg.j⁻¹).

| Aliment | Conso | Classe d'âge | | | | | |
|------------|--------------------|--------------|---------|---------|----------|-----------|--------|
| | | nourrisson | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
| Eau | l.j ⁻¹ | 0,50 | 1,0 | 1,25 | 1,5 | 2 | 2 |
| Végétaux | kg.j ⁻¹ | - | 0,010 | 0,020 | 0,040 | 0,070 | 0,070 |
| Poisson | kg.j ⁻¹ | - | 0,10 | 0,10 | 0,15 | 0,38 | 0,38 |
| Mollusques | kg.j ⁻¹ | - | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,06 |

II.2.5.3 - A TAHITI

La population de Tahiti étant constituée de populations à mode de vie "urbain", vivant à Papeete et dans les environs, ainsi que de populations à mode de vie plus rural, notamment sur les plateaux du sud de l'île, deux rations alimentaires ont été utilisées dans les études.

Tableau 7: Rations alimentaires considérées pour les adultes à Tahiti (g.j⁻¹).

| Catégorie | Aliment | Zone urbaine (Papeete) | | Zone "rurale" - reconstruit | |
|------------|--------------------|------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|
| | | Quantité | | Quantité | |
| | | par aliment | par catégorie | par aliment | par catégorie |
| boisson | eau | 2700 | | 1000 | |
| | eau de citerne | | | | |
| | eau de coco | 5 | | 2000 | |
| | lait | 300 | | | 300 |
| poissons | thon | 13 | 373 | | 470 |
| | bonite | 106 | | | |
| | ature | 18 | | | |
| | inaa | 5 | | | |
| | poissons haute mer | | | 30 | |
| | poissons lagon | 231 | | 440 | |
| Viandes | poulet | 1 | 78 | 10 | 30 |
| | porc | 49 | | 10 | |
| | bœuf | 28 | | | |
| | chien | | | 10 | |
| Œufs | | 30 | 30 | 30 | 30 |
| mollusques | turbo | 15 | 30 | 60 | 190 |
| | bénitier | 15 | | 100 | |
| | poulpe | | | 30 | |
| | autres mollusques | | | | |
| crustacés | chevrettes | 1 | 2 | | 20 |

| Catégorie | Aliment | Zone urbaine (Papeete) | | Zone "rurale" - reconstruit | |
|------------------------------|--------------------|------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|
| | | Quantité | | Quantité | |
| | | par aliment | par catégorie | par aliment | par catégorie |
| | langouste | 1 | | 20 | |
| coprah | | 6 | 6 | 220 | 220 |
| fruits plantes arborescentes | banane | 40 | 194 | 50 | 170 |
| | papaye | 12 | | 60 | |
| | citron | 19 | | | |
| | mangue | 32 | | | |
| | avocat | 6 | | | |
| | pamplemousse | 5 | | | |
| | uru | 28 | | 60 | |
| | autres fruits | 52 | | | |
| fruits plantes herbacées | ananas | 28 | 240 | | |
| | tomates | 28 | | | |
| | concombre | 17 | | | |
| | aubergine | 3 | | | |
| | autres fruits | 164 | | | |
| légumes feuilles | salade | 20 | 63 | | 63 |
| | chou | 18 | | | |
| | poireau | 3 | | | |
| | fafa | 2 | | | |
| | autres légumes | 20 | | | |
| racines et tubercules | taro | 48 | 115 | | |
| | patate douce | 26 | | | |
| | tarua | 13 | | | |
| | navet | 12 | | | |
| | carotte | 10 | | | |
| | manioc | | | | |
| | autres | 6 | | | |
| | total local | | 1101 | | 1100 |

Tableau 8: Consommation en fonction de l'âge et de la population à Tahiti.

| Aliment | Conso | Lieu | Classe d'âge | | | | | |
|---------------|--------------------|---------------------------------------|--------------|---------|---------|----------|-----------|--------|
| | | | nourrisson | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | Adulte |
| Eau | l.j ⁻¹ | Pirae | 0,5 | 1 | 1,25 | 1,5 | 2 | 2,7 |
| | | Hitiaa | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1 |
| | | Sud de Teahupoo et plateau de Taravao | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1 |
| Lait de vache | l.j ⁻¹ | Tous | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Viande | kg.j ⁻¹ | "urbain" | - | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,08 | 0,08 |
| | | "rural" | - | 0,01 | 0,01 | 0,015 | 0,03 | 0,03 |
| Œufs | g.j ⁻¹ | Tous | - | 10 | 15 | 15 | 30 | 30 |
| | | | - | 2 | 3 | 3 | 7 | 7 |
| Végétaux | kg.j ⁻¹ | Tous | - | 0,03 | 0,05 | 0,075 | 0,1 | 0,1 |
| Poisson | kg.j ⁻¹ | "urbain" | - | 0,10 | 0,10 | 0,15 | 0,37 | 0,37 |
| | | "rural" | - | 0,10 | 0,20 | 0,3 | 0,47 | 0,47 |
| Mollusques | kg.j ⁻¹ | "urbain" Bénitier | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,03 |
| | | "rural" Bénitier | 0 | 0,03 | 0,05 | 0,10 | 0,19 | 0,19 |
| | | "urbain" et "rural" Chevrette | 0 | 0,005 | 0,005 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |

Faute d'information sur la consommation des adultes menant un mode de vie rural à Tahiti, leur ration alimentaire a été déduite des rations alimentaires des habitants des autres lieux de retombées pour les aliments cultivés à Tahiti et en y ajoutant du lait, non consommé ailleurs.

III - MESURES DISPONIBLES

III.1 - MESURES "PHYSIQUES"

III.1.1 - ACTIVITES DANS L'AIR

Les mesures de l'activité dans l'air ne sont pas utilisées dans les calculs de doses car il s'agit le plus souvent de valeurs instantanées, insuffisantes pour le calcul de la dose par irradiation externe par le panache et de la dose interne par inhalation.

III.1.2 - DEPOTS

On dispose le plus souvent de mesures de dépôts, exprimés en β global, en Bq.m^{-2} ou en Ci.m^{-2} .

III.1.3 - DEBITS DE DOSE DUS AUX DEPOTS

Les mesures physiques disponibles sont souvent des débits de dose dus aux dépôts, exprimés en $\mu\text{Gy.h}^{-1}$ ou en mrad.h^{-1} .

III.1.4 - EAUX DE BOISSON

Des mesures de l'activité de l'eau prélevée dans des citernes sont parfois disponibles.

III.2 - MESURES DANS LES MILIEUX BIOLOGIQUES

Les mesures disponibles dans les milieux biologiques sont exploitées même si elles ont été réalisées tardivement par rapport à la retombée ; elles peuvent être exprimées en Ci.kg^{-1} ou en Bq.kg^{-1} , pour l'ensemble des émetteurs β (β global) ou par isotope.

On peut disposer de mesures dans des bécotiers, langoustes et turbos (mollusques et crustacés). Des mesures dans du poisson de lagon ou de récif sont parfois disponibles.

Des mesures dans des végétaux (fafa, salades, choux chinois) ou dans de l'eau de coco sont disponibles.

Selon les essais, essentiellement lors des retombées à Tahiti, on dispose de mesures dans du poulet, du porc, des œufs ... A Tahiti, il est possible de disposer de mesures, notamment d'iode, dans du lait de vache.

IV - CONCLUSION

Grâce à la connaissance du terme source émis lors des essais nucléaires atmosphériques et à l'utilisation des mesures réalisées dans l'environnement après les essais, il a été possible d'évaluer l'impact radiologique de quelques essais nucléaires aériens réalisés en Polynésie.

Cette méthode pourra être appliquée à l'ensemble des essais nucléaires aériens réalisés tant en Polynésie Française que sur d'autres territoires, pour lesquels des mesures, notamment de dépôt, ont été réalisées après les retombées.

V - ANNEXE 1 : DONNEES DE CALCUL

V.1 - COEFFICIENTS DE DOSE

Tableau 9: Exemples de coefficients de dose externe due au dépôt (Sv.h⁻¹)/(Bq.m⁻²) et de dose efficace par inhalation (Sv.Bq⁻¹).

| | période | C Dose dépôt (Sv/h)/(Bq/m ²) | Coefficient de dose efficace par inhalation (Sv/Bq) | | | | | |
|--------------|----------|---|---|-----------|-----------|------------|-------------|----------|
| | | | baby | 1-2 years | 2-7 years | 7-12 years | 12-17 years | adult |
| C14 aérosols | 5.73E3 a | 5.80E-17 | bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | adulte |
| Br83 | 2.39 h | 2.93E-14 | 1.90E-08 | 1.70E-08 | 1.10E-08 | 7.40E-09 | 6.40E-09 | 5.80E-09 |
| Rb88 | 0.297 h | 2.14E-12 | 3.50E-10 | 2.30E-10 | 1.10E-10 | 7.70E-11 | 5.90E-11 | 4.80E-11 |
| Sr91 | 9.50 h | 3.52E-12 | 1.90E-10 | 1.20E-10 | 5.20E-11 | 3.20E-11 | 1.90E-11 | 1.60E-11 |
| Sr92 | 2.71 h | 4.50E-12 | 3.10E-09 | 2.20E-09 | 1.10E-09 | 6.90E-10 | 4.40E-10 | 3.70E-10 |
| Y91 m | 0.828 h | 1.88E-12 | 1.90E-09 | 1.40E-09 | 6.50E-10 | 4.10E-10 | 2.50E-10 | 2.10E-10 |
| Y92 | 3.54 h | 9.11E-13 | 7.40E-11 | 5.90E-11 | 3.10E-11 | 2.00E-11 | 1.40E-11 | 1.10E-11 |
| Y93 | 10.1 h | 3.28E-13 | 1.90E-09 | 1.20E-09 | 5.50E-10 | 3.50E-10 | 2.10E-10 | 1.80E-10 |
| Zr97 | 16.9 h | 3.05E-12 | 4.60E-09 | 3.00E-09 | 1.40E-09 | 8.50E-10 | 5.00E-10 | 4.20E-10 |
| Nb97 | 1.20 h | 2.32E-12 | 7.80E-09 | 5.30E-09 | 2.80E-09 | 1.80E-09 | 1.10E-09 | 9.20E-10 |
| Mo99 | 2.75 j | 5.29E-13 | 3.70E-10 | 2.50E-10 | 1.20E-10 | 7.70E-11 | 5.20E-11 | 4.30E-11 |
| Tc99 m | 6.02 h | 4.36E-13 | 6.00E-09 | 4.40E-09 | 2.20E-09 | 1.50E-09 | 1.10E-09 | 8.90E-10 |
| Ru103 | 39.3 j | 1.67E-12 | 1.30E-10 | 9.90E-11 | 5.10E-11 | 3.40E-11 | 2.40E-11 | 1.90E-11 |
| Ru105 | 4.44 h | 2.77E-12 | 1.10E-08 | 8.40E-09 | 5.00E-09 | 3.50E-09 | 3.00E-09 | 2.40E-09 |
| Rh105 | 1.47 j | 2.74E-13 | 1.30E-09 | 9.20E-10 | 4.50E-10 | 3.00E-10 | 2.00E-10 | 1.70E-10 |
| Rh103 m | 0.935 h | 4.50E-15 | 2.40E-09 | 1.70E-09 | 8.00E-10 | 5.60E-10 | 4.50E-10 | 3.50E-10 |
| Pd109 | 13.4 h | 4.03E-14 | 2.00E-11 | 1.30E-11 | 6.70E-12 | 4.30E-12 | 3.20E-12 | 2.70E-12 |
| Ag112 | 3.12 h | 2.28E-12 | 2.70E-09 | 1.90E-09 | 9.30E-10 | 6.30E-10 | 4.60E-10 | 3.70E-10 |
| Sb129 | 0.173 h | 6.98E-12 | 9.80E-10 | 6.40E-10 | 2.80E-10 | 1.70E-10 | 9.10E-11 | 7.60E-11 |
| Te129 | 1.16 h | 2.16E-13 | 2.00E-09 | 1.40E-09 | 6.80E-10 | 4.40E-10 | 2.90E-10 | 2.30E-10 |
| Te131 | 0.417 h | 1.48E-12 | 3.30E-10 | 2.20E-10 | 9.90E-11 | 6.50E-11 | 4.40E-11 | 3.70E-11 |
| Te131 m | 1.25 j | 5.26E-12 | 2.60E-10 | 1.70E-10 | 8.10E-11 | 5.20E-11 | 3.50E-11 | 2.80E-11 |
| Te132 | 3.26 j | 8.78E-12 | 7.90E-09 | 5.80E-09 | 3.00E-09 | 1.90E-09 | 1.20E-09 | 9.40E-10 |
| I131 vapeur | 8.04 j | 1.35E-12 | 1.60E-08 | 1.30E-08 | 6.40E-09 | 4.00E-09 | 2.60E-09 | 2.00E-09 |
| I132 vapeur | 2.30 h | 7.96E-12 | 1.70E-07 | 1.60E-07 | 9.40E-08 | 4.80E-08 | 3.10E-08 | 2.00E-08 |
| I133 vapeur | 20.8 h | 2.15E-12 | 2.80E-09 | 2.30E-09 | 1.30E-09 | 6.40E-10 | 4.30E-10 | 3.10E-10 |
| I134 vapeur | 0.876 h | 9.11E-12 | 4.50E-08 | 4.10E-08 | 2.10E-08 | 9.70E-09 | 6.30E-09 | 4.00E-09 |
| I135 vapeur | 6.61 h | 5.29E-12 | 8.20E-09 | 6.90E-10 | 3.90E-10 | 2.20E-10 | 1.60E-10 | 1.50E-10 |
| Cs134 | 2.06 a | 5.47E-12 | 9.70E-09 | 8.50E-09 | 4.50E-09 | 2.10E-09 | 1.40E-09 | 9.20E-10 |
| Cs134m | 2.90 h | 9.32E-14 | 1.10E-08 | 7.30E-09 | 5.20E-09 | 5.30E-09 | 6.30E-09 | 6.60E-09 |
| Cs135 | 2.30E6 a | 1.20E-16 | 1.30E-10 | 8.60E-11 | 3.80E-11 | 2.50E-11 | 1.60E-11 | 1.40E-11 |
| Cs135m | 0.883 h | 5.54E-12 | 1.70E-09 | 9.90E-10 | 6.20E-10 | 6.10E-10 | 6.80E-10 | 6.90E-10 |
| Cs136 | 13.1 j | 7.52E-12 | 9.20E-11 | 7.80E-11 | 4.10E-11 | 2.40E-11 | 1.50E-11 | 1.20E-11 |
| Cs137 | 30.0 a | 2.00E-12 | 7.30E-09 | 5.20E-09 | 2.90E-09 | 2.00E-09 | 1.40E-09 | 1.20E-09 |
| Cs138 | 0.536 h | 7.88E-12 | 8.80E-09 | 5.40E-09 | 3.60E-09 | 3.70E-09 | 4.40E-09 | 4.60E-09 |
| Ba139 | 1.38 h | 1.65E-13 | 2.60E-10 | 1.80E-10 | 8.10E-11 | 5.00E-11 | 2.90E-11 | 2.40E-11 |
| Ba140 | 12.7 j | 8.42E-12 | 5.40E-10 | 3.50E-10 | 1.60E-10 | 1.00E-10 | 6.60E-11 | 5.60E-11 |
| La141 | 3.93 h | 1.63E-13 | 2.70E-08 | 2.00E-08 | 1.10E-08 | 7.60E-09 | 6.20E-09 | 5.10E-09 |
| La142 | 1.54 h | 8.86E-12 | 1.40E-09 | 9.30E-10 | 4.30E-10 | 2.80E-10 | 1.80E-10 | 1.50E-10 |
| Ce141 | 32.5 j | 2.66E-13 | 8.10E-10 | 5.70E-10 | 2.70E-10 | 1.70E-10 | 1.10E-10 | 8.90E-11 |
| Ce143 | 1.38 j | 1.00E-12 | 1.40E-08 | 1.10E-08 | 6.30E-09 | 4.60E-09 | 4.10E-09 | 3.20E-09 |
| Pr145 | 5.98 h | 5.62E-14 | 5.60E-09 | 3.90E-09 | 1.90E-09 | 1.30E-09 | 9.30E-10 | 7.50E-10 |
| Nd147 | 11.0 j | 5.00E-13 | 1.60E-09 | 1.10E-09 | 4.90E-10 | 3.20E-10 | 2.00E-10 | 1.70E-10 |
| Nd149 | 1.73 h | 1.36E-12 | 1.20E-08 | 8.60E-09 | 4.90E-09 | 3.50E-09 | 3.00E-09 | 2.40E-09 |
| Pm149 | 2.21 j | 4.07E-14 | 7.10E-10 | 4.80E-10 | 2.30E-10 | 1.50E-10 | 1.10E-10 | 8.90E-11 |
| Pm151 | 1.18 j | 1.13E-12 | 5.30E-09 | 3.60E-09 | 1.80E-09 | 1.20E-09 | 9.00E-10 | 7.30E-10 |
| Sm153 | 1.95 j | 2.24E-13 | 3.40E-09 | 2.60E-09 | 1.30E-09 | 7.90E-10 | 5.70E-10 | 4.60E-10 |
| Sm156 | 9.40 h | 4.21E-13 | 4.20E-09 | 2.90E-09 | 1.50E-09 | 1.00E-09 | 7.90E-10 | 6.30E-10 |
| U237 | 6.75 j | 4.79E-13 | 1.60E-09 | 1.10E-09 | 5.80E-10 | 3.50E-10 | 2.70E-10 | 2.20E-10 |
| Np237 | 2.14E6 a | 8.05E-13 | 7.80E-09 | 5.70E-09 | 3.30E-09 | 2.40E-09 | 2.10E-09 | 1.70E-09 |
| Np239 | 2.36 j | 5.87E-13 | 4.40E-05 | 4.00E-05 | 2.80E-05 | 2.20E-05 | 2.20E-05 | 2.30E-05 |
| Pu238 | 87.7 a | 3.02E-15 | 5.90E-09 | 4.20E-09 | 2.00E-09 | 1.40E-09 | 9.30E-10 | 9.30E-10 |
| Pu239 | 2.41E4 a | 1.32E-15 | 7.80E-05 | 7.40E-05 | 5.60E-05 | 4.40E-05 | 4.30E-05 | 4.60E-05 |
| Pu240 | 6.54E3 a | 2.89E-15 | 8.00E-05 | 7.70E-05 | 6.00E-05 | 4.80E-05 | 4.70E-05 | 5.00E-05 |
| Pu241 | 14.4 a | 1.87E-17 | 8.00E-05 | 7.70E-05 | 6.00E-05 | 4.80E-05 | 4.70E-05 | 5.00E-05 |
| Pu242 | 3.76E5 a | 2.40E-15 | 9.10E-07 | 9.70E-07 | 9.20E-07 | 8.30E-07 | 8.60E-07 | 9.00E-07 |
| Am241 | 432 a | 9.90E-14 | 7.60E-05 | 7.30E-05 | 5.70E-05 | 4.50E-05 | 4.50E-05 | 4.80E-05 |

Tableau 10: Exemples de coefficients de dose efficace par ingestion (Sv.Bq⁻¹).

| | Coefficient de dose efficace par ingestion (Sv/Bq) | | | | | |
|--------------|--|----------|----------|----------|-----------|----------|
| | bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | adulte |
| C14 aérosols | 1.40E-09 | 1.60E-09 | 9.90E-10 | 8.00E-10 | 5.70E-10 | 5.80E-10 |
| Br83 | 5.30E-10 | 3.00E-10 | 1.40E-10 | 8.30E-11 | 5.50E-11 | 4.30E-11 |
| Rb88 | 1.10E-09 | 6.20E-10 | 3.00E-10 | 1.70E-10 | 1.20E-10 | 9.00E-11 |
| Sr91 | 5.20E-09 | 4.00E-09 | 2.10E-09 | 1.20E-09 | 7.40E-10 | 6.50E-10 |
| Sr92 | 3.40E-09 | 2.70E-09 | 1.40E-09 | 8.20E-10 | 4.80E-10 | 4.30E-10 |
| Y91 m | 9.20E-11 | 6.00E-11 | 3.30E-11 | 2.10E-11 | 1.40E-11 | 1.10E-11 |
| Y92 | 5.90E-09 | 3.60E-09 | 1.80E-09 | 1.00E-09 | 6.20E-10 | 4.90E-10 |
| Y93 | 1.40E-08 | 8.50E-09 | 4.30E-09 | 2.50E-09 | 1.40E-09 | 1.20E-09 |
| Zr97 | 2.20E-08 | 1.40E-08 | 7.30E-09 | 4.40E-09 | 2.60E-09 | 2.10E-09 |
| Nb97 | 7.70E-10 | 4.50E-10 | 2.30E-10 | 1.30E-10 | 8.70E-11 | 6.80E-11 |
| Mo99 | 5.50E-09 | 3.50E-09 | 1.80E-09 | 1.10E-09 | 7.60E-10 | 6.00E-10 |
| Tc99 m | 2.00E-10 | 1.30E-10 | 7.20E-11 | 4.30E-11 | 2.80E-11 | 2.20E-11 |
| Ru103 | 7.10E-09 | 4.60E-09 | 2.40E-09 | 1.50E-09 | 9.20E-10 | 7.30E-10 |
| Ru105 | 2.70E-09 | 1.80E-09 | 9.10E-10 | 5.50E-10 | 3.30E-10 | 2.60E-10 |
| Rh105 | 4.00E-09 | 2.70E-09 | 1.30E-09 | 8.00E-10 | 4.60E-10 | 3.70E-10 |
| Rh103 m | 4.70E-11 | 2.70E-11 | 1.30E-11 | 7.40E-12 | 4.80E-12 | 3.80E-12 |
| Pd109 | 6.30E-09 | 4.10E-09 | 2.00E-09 | 1.20E-09 | 6.80E-10 | 5.50E-10 |
| Ag112 | 4.90E-09 | 3.00E-09 | 1.50E-09 | 8.90E-10 | 5.40E-10 | 4.30E-10 |
| Sb129 | 4.30E-09 | 2.80E-09 | 1.50E-09 | 8.80E-10 | 5.30E-10 | 4.20E-10 |
| Te129 | 7.50E-10 | 4.40E-10 | 2.10E-10 | 1.20E-10 | 8.00E-11 | 6.30E-11 |
| Te131 | 9.00E-10 | 6.60E-10 | 3.50E-10 | 1.90E-10 | 1.20E-10 | 8.70E-11 |
| Te131 m | 2.00E-08 | 1.40E-08 | 7.80E-09 | 4.30E-09 | 2.70E-09 | 1.90E-09 |
| Te132 | 4.80E-08 | 3.00E-08 | 1.60E-08 | 8.30E-09 | 5.30E-09 | 3.80E-09 |
| I131 vapeur | 1.80E-07 | 1.80E-07 | 1.00E-07 | 5.20E-08 | 3.40E-08 | 2.20E-08 |
| I132 vapeur | 3.00E-09 | 2.40E-09 | 1.30E-09 | 6.20E-10 | 4.10E-10 | 2.90E-10 |
| I133 vapeur | 4.90E-08 | 4.40E-08 | 2.30E-08 | 1.00E-08 | 6.80E-09 | 4.30E-09 |
| I134 vapeur | 1.10E-09 | 7.50E-10 | 3.90E-10 | 2.10E-10 | 1.40E-10 | 1.10E-10 |
| I135 vapeur | 1.00E-08 | 8.90E-09 | 4.70E-09 | 2.20E-09 | 1.40E-09 | 9.30E-10 |
| Cs134 | 2.60E-08 | 1.60E-08 | 1.30E-08 | 1.40E-08 | 1.90E-08 | 1.90E-08 |
| Cs134m | 2.10E-10 | 1.20E-10 | 5.90E-11 | 3.50E-11 | 2.50E-11 | 2.00E-11 |
| Cs135 | 4.10E-09 | 2.30E-09 | 1.70E-09 | 1.70E-09 | 2.00E-09 | 2.00E-09 |
| Cs135m | 1.30E-10 | 8.60E-11 | 4.90E-11 | 3.20E-11 | 2.30E-11 | 1.90E-11 |
| Cs136 | 1.50E-08 | 9.50E-09 | 6.10E-09 | 4.40E-09 | 3.40E-09 | 3.00E-09 |
| Cs137 | 2.10E-08 | 1.20E-08 | 9.60E-09 | 1.00E-08 | 1.30E-08 | 1.30E-08 |
| Cs138 | 1.10E-09 | 5.90E-10 | 2.90E-10 | 1.70E-10 | 1.20E-10 | 9.20E-11 |
| Ba139 | 1.40E-09 | 8.40E-10 | 4.10E-10 | 2.40E-10 | 1.50E-10 | 1.20E-10 |
| Ba140 | 3.20E-08 | 1.80E-08 | 9.20E-09 | 5.80E-09 | 3.70E-09 | 2.60E-09 |
| La141 | 4.30E-09 | 2.60E-09 | 1.30E-09 | 7.60E-10 | 4.50E-10 | 3.60E-10 |
| La142 | 1.90E-09 | 1.10E-09 | 5.80E-10 | 3.50E-10 | 2.30E-10 | 1.80E-10 |
| Ce141 | 8.10E-09 | 5.10E-09 | 2.60E-09 | 1.50E-09 | 8.80E-10 | 7.10E-10 |
| Ce143 | 1.20E-08 | 8.00E-09 | 4.10E-09 | 2.40E-09 | 1.40E-09 | 1.10E-09 |
| Pr145 | 4.70E-09 | 2.90E-09 | 1.40E-09 | 8.50E-10 | 4.90E-10 | 3.90E-10 |
| Nd147 | 1.20E-08 | 7.80E-09 | 3.90E-09 | 2.30E-09 | 1.30E-09 | 1.10E-09 |
| Nd149 | 1.40E-09 | 8.70E-10 | 4.30E-10 | 2.60E-10 | 1.60E-10 | 1.20E-10 |
| Pm149 | 1.20E-08 | 7.40E-09 | 3.70E-09 | 2.20E-09 | 1.20E-09 | 9.90E-10 |
| Pm151 | 8.00E-09 | 5.10E-09 | 2.60E-09 | 1.60E-09 | 9.10E-10 | 7.30E-10 |
| Sm153 | 8.40E-09 | 5.40E-09 | 2.70E-09 | 1.60E-09 | 9.20E-10 | 7.40E-10 |
| Sm156 | 2.80E-09 | 1.80E-09 | 9.00E-10 | 5.40E-10 | 3.10E-10 | 2.50E-10 |
| U237 | 8.30E-09 | 5.40E-09 | 2.80E-09 | 1.60E-09 | 9.50E-10 | 7.60E-10 |
| Np237 | 2.00E-06 | 2.10E-07 | 1.40E-07 | 1.10E-07 | 1.10E-07 | 1.10E-07 |
| Np239 | 8.90E-09 | 5.70E-09 | 2.90E-09 | 1.70E-09 | 1.00E-09 | 8.00E-10 |
| Pu238 | 4.00E-06 | 4.00E-07 | 3.10E-07 | 2.40E-07 | 2.20E-07 | 2.30E-07 |
| Pu239 | 4.20E-06 | 4.20E-07 | 3.30E-07 | 2.70E-07 | 2.40E-07 | 2.50E-07 |
| Pu240 | 4.20E-06 | 4.20E-07 | 3.30E-07 | 2.70E-07 | 2.40E-07 | 2.50E-07 |
| Pu241 | 5.60E-08 | 5.70E-09 | 5.50E-09 | 5.10E-09 | 4.80E-09 | 4.80E-09 |
| Pu242 | 4.00E-06 | 4.00E-07 | 3.20E-07 | 2.60E-07 | 2.30E-07 | 2.40E-07 |
| Am241 | 3.70E-06 | 3.70E-07 | 2.70E-07 | 2.20E-07 | 2.00E-07 | 2.00E-07 |

Tableau 11: Exemples de coefficients de dose à la thyroïde par inhalation (Sv.Bq⁻¹).

| | Coefficient de dose à la thyroïde par inhalation (Sv/Bq) | | | | | |
|---------|--|----------|----------|----------|-----------|----------|
| | bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | adulte |
| Te121 m | 7.70E-09 | 5.70E-09 | 3.10E-09 | 1.60E-09 | 1.10E-09 | 8.70E-10 |
| Te123 | 1.00E-09 | 7.80E-10 | 4.50E-10 | 2.70E-10 | 2.20E-10 | 2.00E-10 |
| Te123 m | 5.50E-09 | 3.90E-09 | 1.90E-09 | 8.90E-10 | 5.80E-10 | 4.10E-10 |
| Te125 m | 4.40E-09 | 3.00E-09 | 1.40E-09 | 6.20E-10 | 3.90E-10 | 2.50E-10 |
| Te127 | 5.90E-11 | 3.40E-11 | 1.50E-11 | 7.10E-12 | 4.10E-12 | 2.80E-12 |
| Te127 m | 1.40E-08 | 9.80E-09 | 4.70E-09 | 2.00E-09 | 1.30E-09 | 8.60E-10 |
| Te129 | 4.50E-12 | 2.80E-12 | 1.30E-12 | 7.40E-13 | 4.40E-13 | 3.50E-13 |
| Te129 m | 1.90E-08 | 1.20E-08 | 5.70E-09 | 2.50E-09 | 1.50E-09 | 1.00E-09 |
| Te131 | 6.80E-10 | 4.60E-10 | 2.40E-10 | 1.20E-10 | 7.30E-11 | 4.80E-11 |
| Te131 m | 3.70E-08 | 2.50E-08 | 1.30E-08 | 6.60E-09 | 4.10E-09 | 2.70E-09 |
| Te132 | 8.70E-08 | 5.30E-08 | 2.40E-08 | 1.10E-08 | 6.60E-09 | 4.30E-09 |
| Te133 | 7.30E-10 | 4.50E-10 | 2.10E-10 | 9.40E-11 | 5.00E-11 | 3.60E-11 |
| Te133 m | 3.30E-09 | 2.00E-09 | 9.40E-10 | 4.20E-10 | 2.50E-10 | 1.60E-10 |
| Te134 | 3.80E-10 | 2.80E-10 | 1.30E-10 | 6.10E-11 | 3.80E-11 | 2.60E-11 |
| I121 | 3.80E-09 | 8.40E-09 | 4.90E-09 | 2.60E-09 | 1.80E-09 | 1.20E-09 |
| I123 | 3.90E-08 | 3.50E-08 | 1.90E-08 | 8.60E-09 | 5.70E-09 | 3.70E-09 |
| I125 | 9.30E-07 | 1.00E-06 | 7.50E-07 | 5.60E-07 | 4.00E-07 | 2.70E-07 |
| I128 | 1.90E-09 | 1.70E-09 | 8.60E-10 | 3.70E-10 | 2.40E-10 | 1.50E-10 |
| I129 | 3.30E-06 | 3.90E-06 | 3.10E-06 | 3.40E-06 | 2.50E-06 | 1.90E-06 |
| I130 | 3.60E-07 | 3.30E-07 | 1.70E-07 | 8.00E-08 | 5.20E-08 | 3.30E-08 |
| I131 | 3.30E-06 | 3.20E-06 | 1.90E-06 | 1.10E-07 | 6.20E-07 | 3.90E-07 |
| I132 | 4.30E-08 | 3.80E-08 | 2.00E-08 | 8.90E-09 | 5.80E-09 | 3.60E-09 |
| I132 m | 3.90E-08 | 3.50E-08 | 1.80E-08 | 8.20E-09 | 5.30E-09 | 1.30E-09 |
| I133 | 8.90E-07 | 8.00E-07 | 4.20E-07 | 1.90E-07 | 1.20E-07 | 7.60E-08 |
| I134 | 8.20E-09 | 7.30E-09 | 3.80E-09 | 1.70E-09 | 1.10E-09 | 7.00E-10 |
| I135 | 1.80E-07 | 1.60E-07 | 8.00E-09 | 3.80E-08 | 2.40E-08 | 1.50E-08 |

Tableau 12: Exemples de coefficients de dose à la thyroïde par ingestion (Sv.Bq⁻¹).

| | Coefficient de dose à la thyroïde par ingestion (Sv/Bq) | | | | | |
|---------|---|----------|----------|----------|-----------|----------|
| | bébé | 1-2 ans | 2-7 ans | 7-12 ans | 12-17 ans | adulte |
| Te121 | 3.80E-09 | 1.70E-09 | 9.70E-10 | 5.30E-10 | 3.80E-10 | 2.80E-10 |
| Te121 m | 3.00E-08 | 1.30E-08 | 7.30E-09 | 3.60E-09 | 2.50E-09 | 1.80E-09 |
| Te123 | 4.00E-09 | 1.80E-09 | 1.10E-09 | 7.10E-10 | 5.80E-10 | 4.90E-10 |
| Te123 m | 2.70E-08 | 1.20E-08 | 6.40E-09 | 2.90E-09 | 1.90E-09 | 1.20E-09 |
| Te125 m | 2.50E-08 | 1.10E-08 | 5.80E-09 | 2.60E-09 | 1.60E-09 | 1.00E-09 |
| Te127 | 4.50E-10 | 1.70E-10 | 8.90E-11 | 4.10E-11 | 2.60E-11 | 1.70E-11 |
| Te127 m | 7.60E-08 | 3.40E-08 | 1.80E-08 | 7.70E-09 | 4.90E-09 | 3.10E-09 |
| Te129 | 2.40E-11 | 6.30E-12 | 3.10E-12 | 1.70E-12 | 1.00E-12 | 7.50E-13 |
| Te129 m | 1.10E-07 | 5.10E-08 | 2.60E-08 | 1.10E-08 | 7.40E-09 | 4.60E-09 |
| Te131 | 7.60E-09 | 7.30E-09 | 4.30E-09 | 2.10E-09 | 1.40E-09 | 8.90E-10 |
| Te131 m | 2.60E-07 | 1.50E-07 | 8.90E-08 | 4.50E-08 | 2.90E-08 | 1.80E-08 |
| Te132 | 6.50E-07 | 3.20E-07 | 1.70E-07 | 7.50E-08 | 1.49E-07 | 3.10E-08 |
| Te133 | 9.50E-09 | 8.50E-09 | 4.50E-09 | 2.00E-09 | 1.30E-09 | 8.10E-10 |
| Te133 m | 3.90E-08 | 3.40E-08 | 1.80E-08 | 8.00E-09 | 5.10E-09 | 3.20E-09 |
| Te134 | 6.30E-09 | 5.50E-09 | 2.90E-09 | 1.30E-09 | 8.30E-10 | 5.20E-10 |
| I121 | 8.80E-09 | 8.30E-09 | 4.90E-09 | 2.60E-09 | 1.80E-09 | 1.20E-09 |
| I123 | 4.10E-08 | 3.70E-08 | 2.00E-08 | 9.20E-09 | 6.10E-09 | 3.90E-09 |
| I125 | 1.00E-06 | 1.10E-06 | 8.20E-07 | 6.20E-07 | 4.40E-07 | 3.00E-07 |
| I128 | 1.10E-09 | 1.00E-09 | 5.10E-10 | 2.20E-10 | 1.40E-10 | 8.90E-11 |
| I129 | 3.70E-06 | 4.30E-06 | 3.40E-06 | 3.80E-06 | 2.80E-06 | 2.10E-06 |
| I130 | 3.90E-07 | 3.50E-07 | 1.90E-07 | 8.50E-08 | 5.60E-08 | 3.60E-08 |
| I131 | 3.70E-06 | 3.60E-06 | 2.10E-06 | 1.00E-06 | 6.80E-07 | 4.30E-07 |
| I132 | 4.00E-08 | 3.50E-08 | 1.90E-08 | 8.30E-09 | 5.40E-09 | 3.40E-09 |
| I132 m | 3.80E-08 | 3.40E-08 | 1.80E-08 | 8.00E-09 | 5.20E-09 | 3.30E-09 |
| I133 | 9.60E-07 | 8.60E-07 | 4.60E-07 | 2.00E-07 | 1.30E-07 | 8.20E-08 |
| I134 | 6.30E-09 | 5.60E-09 | 2.90E-09 | 1.30E-09 | 8.50E-10 | 5.40E-10 |
| I135 | 1.90E-07 | 1.70E-07 | 8.70E-08 | 3.90E-08 | 2.50E-08 | 1.60E-08 |

VI - REFERENCES

Base de données JEFF - Joint Evaluation Fission and Fusion File – AEN – février 2005.

Arrêté du 01/09/2003 pour le calcul des doses efficaces définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.

Directive Euratom 96-29 - Nouvelle directive fixant les normes de base n°96/29/Euratom du 13/05/96 – Journal Officiel de la Communauté Européenne L159 du 29 juin 1996.

CIPR 71: Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients; Volume 25, n° 3-4, 1995 / CIPR 72: Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients.

ICRP Publication 66: Human respiratory tract model for radiological protection – 1993.

External Exposure to Radionuclides in air, water and soil - Federal Guidance Report N° 12, 1993.

APPENDICE II. QUESTION DE LA VITESSE DE DÉPÔT

Les doses dues à l'inhalation sont estimées à partir de l'activité de l'air intégrée sur le temps notée C_a et du débit pulmonaire. C_a est évaluée d'après l'activité déposée par unité de surface D et la vitesse de dépôt v_g . Généralement, la vitesse de dépôt n'est déterminée que pour un dépôt sec. Les valeurs standards pour le dépôt de particules d'une taille proche de $1 \mu\text{m}$ tournent autour de $0,001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Les particules de cette taille se retrouvent typiquement dans les zones éloignées du point de rejet, lorsque le panache a déjà perdu les grosses particules qui sont sujettes à la sédimentation. En plus de la taille des particules, la vitesse du vent, la surface de la canopée et l'humidité de l'air sont des facteurs influant sur le dépôt sec. Les gaz réactifs tels que l'iode élémentaire ont des vitesses de dépôt de l'ordre de $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tandis que pour les gaz non réactifs, comme l'iodure de méthyle, v_g est de l'ordre de $0,0001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

A l'origine, la vitesse de dépôt n'était définie que pour le dépôt sec. Cependant, dans certaines évaluations, elle prenait également en compte les contributions des dépôts associés à des précipitations: on parle alors de vitesse de dépôt globale v_b . En raison du lessivage efficace des particules par la pluie, les vitesses de dépôt globales sont beaucoup plus élevées que celles qui se rapportent exclusivement au dépôt sec. En outre, elles sont sujettes à d'importantes variations, liées aux variations d'intensité des pluies.

Le dépôt humide D_w peut être estimé à partir de la concentration d'activité de l'air proche de la surface C_a et du coefficient de lessivage W_r . Cependant, dans la mesure où l'activité dans l'air est mesurée au sol et où les radionucléides lessivés sont répartis sur tout le panache, dont le profil d'extension et de concentration peut varier, les coefficients de lessivage varient sur une large gamme. Des valeurs établies après l'accident de Tchernobyl dans une zone où le passage du panache avait correspondu avec un épisode pluvieux variaient approximativement entre 400 et $900 \text{ m}^3/\text{L}^{-1}$ pour différents radionucléides [Bq/L de pluie par Bq/m^3 d'air] pour une pluviométrie de $5,6 \text{ mm}$ (Rosner et al., 1990). Ceci montre que la pluie est très efficace pour éliminer les radionucléides de l'atmosphère.

Il faut noter que le coefficient de lessivage et l'intensité de la pluie sont corrélés jusqu'à un certain point. De fortes précipitations sont généralement accompagnées d'un coefficient de lessivage faible et vice versa. Pour une pluviométrie de 20 mm , un coefficient de lessivage de $500 \text{ m}^3/\text{L}$ signifie que les radionucléides d'une colonne haute de $10\,000 \text{ m}$ sont éliminés (à condition que les nuages de pluie se déplacent à la même vitesse que le vent et que la concentration de radionucléides dans le nuage soit homogène). D'ordinaire, les phénomènes météorologiques se produisent dans les couches inférieures de l'atmosphère, de sorte qu'il existe des limites à l'association des coefficients de lessivage avec la quantité de pluie.

La vitesse de dépôt globale peut être calculée à l'aide de la formule suivante:

$$v_b = \frac{v_g \cdot \int_0^T C_a dt + W_r \cdot R \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T C_a dt}{\int_0^T C_a dt}$$

où:

v_b est la vitesse de dépôt globale ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

C_a est l'activité volumique dans l'air ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)

V_g est la vitesse de dépôt ($m \cdot s^{-1}$)

W_R est le coefficient de lessivage (m^3/L) et

R est la pluie (L/m^2)

L'intégration se fait de $t=0$ (arrivée du panache) à $t=T$ (durée du passage du panache).

Cette équation peut être simplifiée comme suit, si C_a est indépendant du temps:

$$v_b = v_g + W_R \cdot R \cdot \frac{1}{T}$$

Ceci signifie que v_b dépend du coefficient de lessivage et de l'intensité de la pluie durant le passage du panache. La dépendance de la vitesse de dépôt globale est représentée sur le schéma II.1, sous forme d'une fonction de la durée du passage du panache et de la pluie pour trois coefficients de lessivage différents ($500 m^3/L$, $200 m^3/L$ et $1000 m^3/L$).

On suppose que la pluie tombe en continu pendant le passage du panache. Il se peut que ce ne soit pas le cas. En outre, il est très peu probable que de fortes pluies coïncident avec de forts coefficients de lessivage, puisque cela implique que les particules soient réparties dans une colonne très haute.

Il faut également noter que le lessivage est un processus dynamique. Lors de fortes pluies notamment, l'activité dans l'air diminue rapidement et une modélisation aussi simple peut difficilement représenter le processus dans son ensemble.

En raison des incertitudes inhérentes au coefficient de lessivage, les valeurs sont nécessairement approximatives, mais elles montrent que même une petite quantité de pluie a une influence énorme sur les activités déposées et par conséquent un impact important sur la vitesse de dépôt globale. Si on garde ces faits à l'esprit, les valeurs de la vitesse de dépôt utilisées dans la méthodologie française ne semblent pas absurdes. Elles montrent également que, même pour des pluies faibles et des coefficients de lessivage faible, le dépôt lié à la pluie est de loin le processus de dépôt le plus important.

PUBLICATIONS UTILISÉES POUR RÉDIGER CETTE ANNEXE

Rosner, G., Hoetzl, H., Winkler, R.: Effect of deposition, washout and resuspension on washout ratios after the Chernobyl accident: *The Science of the Total Environment*, 90, 1–12, (1990).

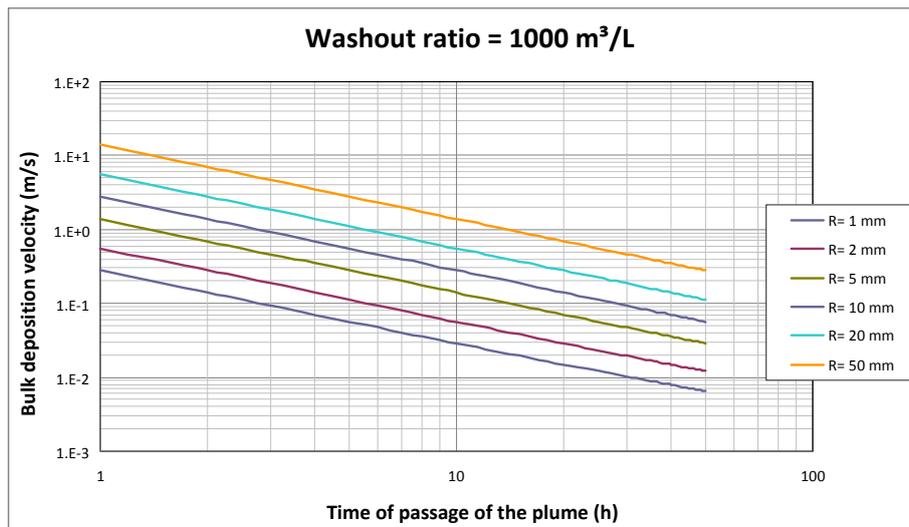
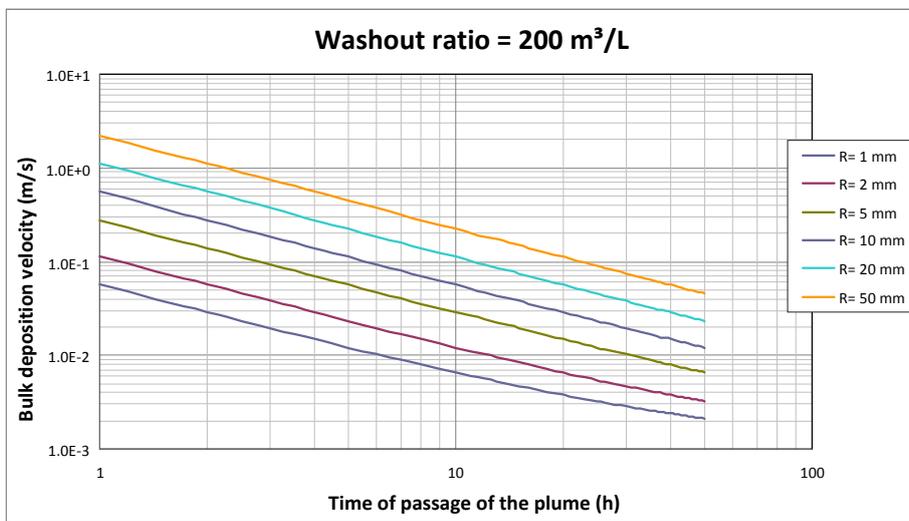
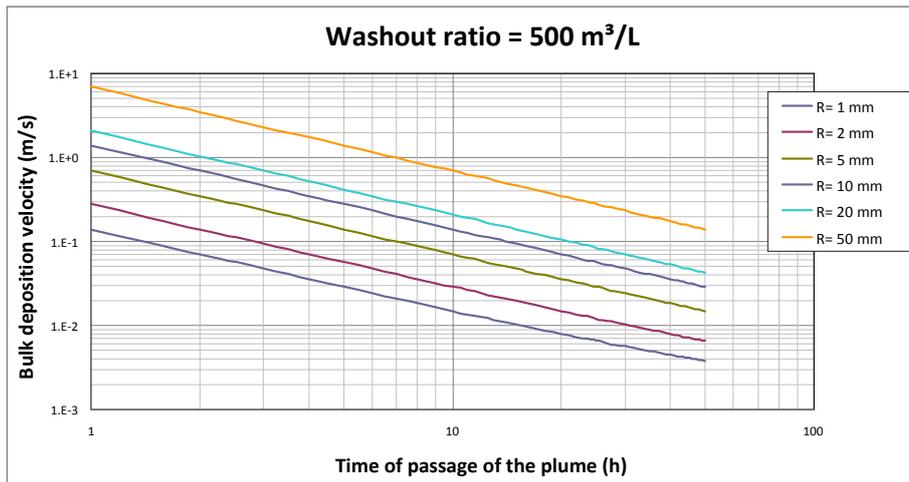


Fig. II.1. Vitesse de dépôt globale en fonction de la durée du passage du panache et de la pluviosité, pour des coefficients de lessivage de 500 m³/L, 200 m³/L, et 1000 m³/L.

APPENDICE III. INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES FOURNIES PAR LA FRANCE

Tableau III.1. Synthèse des principaux thèmes nécessitant un examen aux yeux des évaluateurs suite à la réunion initiale à Paris.

| | Commentaires des évaluateurs | Besoin | Observation |
|---|--|---|--|
| 1 – Vitesse de dépôt (Vd) | La Vd utilisée pour les évaluations est fortement dépendante des caractéristiques physico-chimiques du polluant, de la quantité de pluie, de la solubilité, de la répartition des particules selon leur taille, etc. | Explications claires des évaluations dans tous les cas, des échelles possibles, des variations en fonction du temps et de la distance, estimation du degré d'incertitude de Vd. | |
| 2 – Evaluation du dépôt initial à un endroit donné | L'incertitude associée à l'évaluation du dépôt n'est pas mentionnée, bien qu'il s'agisse d'un processus clé. | Une tentative d'estimation du degré d'incertitude serait très utile. | |
| 3 – Facteurs d'atténuation (abris, filtrage) | Certaines valeurs utilisées pourraient être remises en question dans des circonstances extrêmes (passage du nuage de retombées à une courte distance). | Explication claire et justification des présupposés, des ordres de grandeur, examen du recours à des hypothèses larges (pas de prise en compte du filtrage). | |
| 4 – Transfert à la chaîne alimentaire | Dépôt direct, transfert aux végétaux, transfert au biote marin, facteurs de concentration, demies vies biologiques | Justifier les présupposés, comparer avec des données provenant de références reconnues, estimation de la contribution à l'incertitude. | |
| 5 – Iode organique/élémentaire | La dosimétrie interne de l'iode dépend beaucoup de sa forme chimique, la sélection des facteurs responsables de la dose est donc cruciale | Justifier les présupposés, estimer la contribution aux incertitudes | Les discussions concernant l'iode sont « un problème classique » et il pourrait être opportun de disposer d'une analyse rationnelle dès le début. |
| 6 – Incertitudes/surévaluations | Le manque de précisions sur le degré relatif et global d'incertitude constitue un obstacle pour l'évaluation des résultats. | On attend une évaluation générale des incertitudes (quantitative) et des surévaluations. Afin d'évaluer le degré de surévaluation, des scénarios réalistes devraient être envisagés, si les données existantes le permettent. Les hypothèses et les paramètres pénalisants pourraient être clairement identifiés et interrogés. | L'utilisation d'échelles et, dans certains cas, le recours à des avis d'experts pourraient s'avérer utiles. |
| 7 – Régime alimentaire | Régime alimentaire des jeunes enfants | Une meilleure évaluation/explication des hypothèses : provenance du lait, allaitement, substituts (lait en poudre), consommation totale de liquides (eau, lait, autres), lait de chèvre, eau de coco, etc. | L'estimation du régime alimentaire complet des enfants (lait et autres) et les hypothèses retenues font l'objet de débat. |
| 8 – Tritium | Sa contribution possible à la dose interne n'est pas évoquée. | Discussion sur le tritium (concentrations, pertinence pour la dose interne/externe, etc.) | Pourrait ne pas avoir d'intérêt d'un point de vue radiologique, mais le tritium est généralement un sujet de préoccupation du public. |
| 9 – Données anthropogammamétriques / Mise à jour des données concernant la thyroïde | Elles sont considérées comme un bon moyen de valider les estimations de dose. | Fournir ces données mentionnées dans le rapport. | Au cours de la réunion à Paris, nous avons été informés que la France cherche si ces données sont disponibles. |
| 10 – Objectifs de l'examen par des pairs | Une confirmation des objectifs de l'évaluation tels qu'évoqués au cours de la première réunion de travail. | Il faut une déclaration claire définissant les objectifs de l'évaluation et expliquant comment les résultats seront utilisés par la suite pour permettre aux experts de fournir des conclusions.. | La loi relative à l'indemnisation est désormais adoptée. Il est important de savoir quels éléments permettent de décider d'une indemnisation et quel est le rôle de l'évaluation de la dose (les estimations de dose seront-elles le seul élément servant à déterminer l'indemnisation ou ne seront-elles qu'un des éléments pris en compte ?) |

III.1. Description succincte du processus d'évaluation des doses par les homologues français

Les évaluations de dose ont été réalisées à partir des résultats des mesures effectuées sur des échantillons prélevés dans l'environnement après les retombées radioactives et à partir des mesures de débits de dose. Il n'a pas été mené de calculs de dispersion atmosphérique et l'activité dans l'air a été estimée essentiellement à partir de la mesure du dépôt au sol et du choix d'une vitesse de dépôt. Cette vitesse de dépôt a été évaluée en fonction de la durée du transport des aérosols entre le site d'essai et le lieu des retombées, ainsi que de la durée et de l'intensité des pluies pendant les retombées. Les valeurs d'activité dans les aliments proviennent généralement de mesures directes et, ce n'est que lorsque les résultats des mesures n'étaient pas disponibles que l'activité a été évaluée à partir du dépôt au sol en utilisant des facteurs de transfert.

L'exposition externe due au dépôt au sol a été évaluée à l'aide des résultats des mesures de dépôt effectuées après les essais. Cette évaluation nécessitait de déterminer la durée du transfert depuis les sites d'essai et la contribution à l'activité totale des produits de fission et d'activation, soit 1000 radionucléides produits dans l'atmosphère. L'activité de chaque radionucléide par unité de surface, multipliée par le coefficient de dose pour l'exposition donne le débit de dose du radionucléide, intégrée sur le temps et l'addition des contributions de tous les radionucléides, permet d'obtenir la dose totale d'exposition externe due au dépôt.

III.2. Réponses des homologues français aux commentaires des experts repris dans le tableau III.1. suite à la première réunion de travail

- (1) La méthode choisie pour l'évaluation des activités intégrées dans l'air pendant les retombées nécessitait la détermination de valeurs de vitesse de dépôt. Les valeurs de vitesse de dépôt ont été choisies entre 5×10^{-3} et 3×10^{-1} m.s⁻¹ en fonction de la durée du transport du panache, qui diminue la taille moyenne des particules, et de la présence ou non de pluies pendant les retombées. Les valeurs les plus élevées sont utilisées en cas de transfert rapide du panache et de pluie pendant les retombées. De plus, des vitesses de dépôt sont choisies de façon cohérente avec les résultats de mesures disponibles.
- (2) On n'a pas eu recours à des modèles de transfert atmosphérique pour évaluer le dépôt de radionucléides. Seules les mesures effectuées immédiatement après la fin des retombées sur la zone, objet des calculs de dose, ont été utilisées, sauf dans le cas de l'essai Rigel.
- (3) Pour les doses dues à l'inhalation ou à l'exposition externe du panache, un coefficient d'atténuation n'a été pris en compte que si les retombées avaient eu lieu pendant la nuit ou si la population était abritée pendant les retombées. Par exemple, aucun coefficient d'atténuation n'a été utilisé pour évaluer l'exposition dans le cas de l'essai Aldébaran aux îles Gambier, de l'essai Arcturus à Tureia ou de l'essai Centaure à Tahiti.
- (4) Pour l'exposition externe sur le long terme due au dépôt au sol, un coefficient d'atténuation a été utilisé. Ce coefficient quantifie la réduction de l'exposition liée à l'atténuation due au temps passé à l'intérieur des habitations et, le cas échéant, à l'évacuation temporaire de la population. Ce coefficient est déterminé avec l'hypothèse que les personnes étaient abritées un tiers du temps.
- (5) La dose due à l'ingestion d'aliments contaminés était calculée à partir des résultats des mesures de concentration de la radioactivité dans les aliments produits localement. Seuls les résultats de mesures effectuées dans des échantillons d'aliments prélevés après les retombées ont été utilisés. Le laps de temps écoulé entre le prélèvement de

l'échantillon et les mesures en laboratoire a été pris en compte et l'activité de l'échantillon était calculée après correction de la décroissance radioactive. On supposait que le spectre des radionucléides était le même dans l'échantillon que dans l'air, quelle que soit l'aliment. Le spectre radioactif de l'échantillon peut être calculé à partir de l'activité totale de l'échantillon ou à partir de l'activité d'un radionucléide. Dans ce dernier cas, les activités de tous les radionucléides étaient déterminées en supposant que la proportion de radionucléides était la même dans l'air et dans les aliments. Lorsque aucune mesure n'était disponible, ce qui n'a été le cas que pour l'essai Rigel, les îles Gambier et l'atoll de Tureia, des extrapolations de dose relatives à d'autres essais, étaient effectuées.

- (6) On a retenu l'hypothèse que l'iode était présent sous sa forme élémentaire (I_2), ce qui entraîne une surévaluation des doses dues à l'inhalation, alors qu'il est probable que plusieurs formes chimiques aient été créées au cours du transfert du panache. La forme chimique de l'iode n'est pas prise en compte pour l'évaluation de la dose due à l'ingestion car une seule valeur de coefficient de dose pour l'ingestion est donnée dans les publications 71 et 72 de la CIPR utilisées comme référence pour toutes les formes chimiques.
- (7) On estime que les principales incertitudes sur les résultats des évaluations de dose tiennent au petit nombre d'échantillons d'aliments et au fait que le même spectre de radionucléides standard ait été utilisé quel que soit le milieu ambiant (air, sol, légumes, viande, eau, etc.).
- (8) Des informations concernant les habitudes alimentaires des populations provenant d'études menées avant et pendant la période des essais, sont disponibles pour différents sites : les îles Gambier, Tureia et les zones urbaines et rurales de Tahiti. Aucune étude concernant le régime alimentaire des enfants n'a été faite. Entre les années 1960 et 1970, on considérait que les enfants de 1 à 2 ans buvaient 0,5 litre de lait et un litre d'eau ou d'eau de coco par jour. Ils étaient supposés manger 30 g par jour de mollusques et de crustacés, ainsi que 30 g de fruits et légumes, selon l'endroit où ils vivaient. Les enfants de moins d'un an sont censés boire seulement de l'eau et du lait.
- (9) Le tritium produit au cours d'un essai a été pris en compte dans l'évaluation de dose. Cependant, la dose due spécifiquement au tritium n'a pas été indiquée dans le rapport en raison de sa très faible contribution à la dose.
- (10) Les résultats des évaluations de dose à la thyroïde pour la population des îles Gambier suite à l'essai Aldébaran ont été vérifiés à l'aide de mesures de l'I-131 dans des anthropogammamétries réalisées sur deux hommes qui ont travaillé tous les jours en extérieur à Mangareva depuis le début de l'essai Aldébaran jusqu'au 5 juillet 1966. La totalité de l'iode mesurée dans leur corps a été attribuée à la thyroïde, hypothèse pénalisante. L'activité de l'I-131 mesurée sur l'une des personnes est de 1250 Bq le 10 juillet 1966 et de 390 Bq le 6 juillet 1966 sur l'autre. Les doses à la thyroïde qu'on peut en déduire sont respectivement de 3 mSv et 0,47 mSv, ce qui semble cohérent comparé à l'estimation de la dose à la thyroïde due à l'inhalation, soit 1,3 à 13 mSv.
- (11) Aux termes de la nouvelle loi française, peut réclamer une indemnisation toute personne présentant une maladie liée aux radiations inscrite dans une liste prédéfinie, à condition qu'elle ait habité ou se soit rendue dans une zone donnée à une période donnée. Le plaignant présente un dossier médical, qui fait l'objet d'un examen par une commission spécialisée. Pour les travailleurs ayant participé à un programme de contrôle des doses, les dossiers professionnels sont pris en compte. Pour le public, l'évaluation de dose pourrait être l'un des éléments pris en considération.

III.3. Réponses fournies aux experts par les homologues français pendant la dernière réunion de travail

III.3.1. Mesures pour l'essai Rigel

Aucun résultat de mesure effectuée sur des échantillons d'aliments prélevés à Tureia et aux îles Gambier après l'essai Rigel n'est disponible. Par conséquent, des relations ont été établies pour évaluer la dose interne (inhalation et ingestion) à partir de mesures dans l'air et dans l'eau de pluie. Ces valeurs ont été calculées en s'appuyant sur le rapport entre la dose et le dépôt, en utilisant les résultats des mesures effectuées à Tureia et aux îles Gambier après d'autres essais.

III.3.2. Citernes d'eau à Tureia

Pour évaluer la radioactivité dans l'eau des citernes à partir des résultats des mesures de radioactivité dans l'eau de pluie, il faut connaître :

- le volume d'eau dans les citernes avant que l'eau de pluie contaminée y soit arrivée ;
- le volume d'eau de pluie tombée après les retombées ;
- la répartition des radionucléides dans l'eau, en tenant compte du comportement des éléments non solubles (sédimentation, adsorption).

Comme ces informations ne sont pas disponibles, le scénario suivant, qui prend en compte l'hypothèse la plus pénalisante, a été retenu pour l'évaluation de la dose :

- la cuve est vide avant que l'eau de pluie contaminée y arrive ;
- il ne pleut pas après les retombées ;
- tous les radionucléides sont solubles dans l'eau (aucun radionucléide n'est adsorbé sur les parois de la citerne ni ne se dépose sur les sédiments) ;
- la citerne est l'unique source d'eau potable.

Les incertitudes sur ces paramètres peuvent entraîner soit une surévaluation, soit une sous-évaluation des doses. Les doses évaluées peuvent être considérées comme surévaluées dans des proportions raisonnables.

III.4. Examen des documents relatifs aux mesures de radioactivité sur les îles, les atolls et les archipels habités de Polynésie française, publiés de 1966 à 1974

Ce travail d'examen a été réalisé en 2008 et 2009 et portait sur tous les documents contenant des résultats de mesures effectuées sur les sites suivants :

- L'archipel des Tuamotu, dont Tureia et Hao,
- Les îles de la Société, dont Tahiti, Bora Bora et Huahine,
- Les îles Gambier : Totegegie et Mangareva,
- L'archipel des Marquises : Hiva Hoa,
- Les îles Australes : Rapa, Tubuai et Rururutu.

Parmi les documents archivés et soumis à examen, ceux relatifs aux résultats des mesures de radioactivité sur des échantillons prélevés dans l'environnement entre 1966 et 1974 ont été sélectionnés. Cette sélection rassemble des documents rédigés immédiatement après le

prélèvement des échantillons dans l'environnement ainsi que des rapports de synthèse portant sur différentes périodes. Les rapports étaient intitulés « Retombées radioactives à la suite des tirs nucléaires en Polynésie française » et envoyés annuellement à l'UNSCEAR.

Les résultats des mesures ainsi que les paramètres caractérisant chaque résultat (date de prélèvement, lieu de prélèvement, type d'échantillon, type de mesure, etc.) ont été utilisés dans le cadre des reconstitutions de dose. Les résultats des mesures ont été donnés à la date du prélèvement.

III.5. Données utilisées pour l'évaluation des doses reçues par la population des îles Gambier après l'essai Aldébaran

Les informations disponibles pour calculer les doses reçues par la population des îles Gambier sont les suivantes :

- Date et durée des retombées sur les îles Gambier : entre 16h20 et 17h40 le 2 juillet 1966 ;
- Valeur de dépôt exprimée en activité bêta total : $5,9 \times 10^7$ Bq.m⁻²;
- Un résultat de mesure d'activité dans l'air provenant d'un prélèvement de 900 m³ d'air effectué de 17h30 le 1^{er} juillet 1966 à 16h40 le 2 juillet 1966 (référéncé comme filtre 1). L'activité moyenne de l'air durant le passage du panache (20 minutes), est de 20 Bq.m⁻³;
- Un résultat de mesure d'activité dans l'air provenant d'un échantillon de 900 m³ d'air prélevé entre 16h40 le 2 juillet 1966 et 05h50 le 3 juillet 1966 (référéncé comme filtre 2), correspondant à une activité moyenne de 207 Bq.m⁻³ durant le passage du panache (60 minutes), ce qui correspond à une valeur intégrée de $7,5 \times 10^5$ Bq.s.m⁻³;
- L'activité d'un petit nombre de radionucléides ramenée à l'activité totale a été estimée sur le filtre 2:

| | |
|--------|-------|
| I-131 | 0,03% |
| Mo-99 | 3,2% |
| Ru-103 | 0,07% |
| Te-132 | 0,79% |
| Ba-140 | 0,25% |
| La-140 | 0,1% |

Les autres résultats disponibles sont:

- Les résultats de l'anthropogammamétrie d'un employé chargé d'effectuer les prélèvements dans l'environnement :

| | |
|-----------|---------|
| I-131 | 1250 Bq |
| I-132 | 1400 Bq |
| I-133 | 70 Bq |
| Mo-99 | 700 Bq |
| Ru-103 | 300 Bq |
| Te-132 | 800 Bq |
| La/Ba-140 | 3400 Bq |
- Les résultats de la mesure de l'I-131 dans la thyroïde d'un veau : 1500 Bq.
- Une mesure dont le résultat est égal à $6,7 \times 10^5$ Bq.kg⁻¹ a été relevée dans une salade non lavée. Un calcul théorique s'appuyant sur la mesure du dépôt, avec un facteur

d'interception de 0,1 et une biomasse de légumes feuilles de 1 kg.m^{-2} donne un résultat de $5,9 \times 10^6 \text{ Bq.kg}^{-1}$. Bien que l'écart entre le calcul théorique et la mesure directe soit proche de 10, les mesures du dépôt et de la salade sont cohérentes. Pour les évaluations de dose, c'est la valeur la plus élevée qui a été utilisée.

- On a évalué la part théorique d'I-131 à 0,45 % de l'activité totale des aérosols, 11 heures après l'essai.

Les résultats de l'anthropogammamétrie correspondent à une incorporation par inhalation d'environ 5000 Bq d'I-131. Cette dose inhalée correspond à une concentration atmosphérique moyenne de 4000 Bq.m^{-3} pendant le passage du panache (80 minutes) et, à une activité moyenne totale de $8,9 \times 10^5 \text{ Bq.m}^{-3}$ ou à une concentration intégrée dans l'air de $4,3 \times 10^9 \text{ Bq.s.m}^{-3}$. Le rapport entre le dépôt au sol, l'activité mesurée dans l'air et les résultats des mesures à la thyroïde montre que les mesures de l'activité dans l'air sont largement sous-évaluées et ne peuvent être utilisées. C'est ce qu'indiquaient les rapports rédigés juste après l'essai, notifiant un mauvais fonctionnement des préleveurs d'air. Par conséquent, le scénario suivant, qui apparaît comme le plus probable, a été retenu :

- Utiliser la mesure de dépôt: $5,9 \times 10^7 \text{ Bq.m}^{-2}$, qui semble cohérente comparée avec les mesures effectuées sur la salade non lavée;
- Choisir une vitesse de dépôt de 10^{-2} m.s^{-1} , qui amène à une activité intégrée dans l'air égale à $6 \times 10^9 \text{ Bq.s.m}^{-3}$ équivalent à une activité moyenne de $1,25 \times 10^6 \text{ Bq.m}^{-3}$ pendant le passage du panache. Ceci équivaut à 5700 Bq.m^{-3} d'I-131. Cette vitesse de dépôt cadre bien avec toutes les mesures disponibles et la proportion théorique d'iode.

Retenir une vitesse de dépôt de 10^{-3} m.s^{-1} amènerait à conclure à une activité dans l'air plus importante et surévaluerait la dose à la thyroïde, ce qui ne cadrerait pas avec l'anthropogammamétrie. Choisir au contraire une vitesse de 10^{-1} m.s^{-1} amènerait à déduire une l'activité dans l'air inférieure et sous-évaluerait la dose à la thyroïde.

En conclusion, on peut conclure que le scénario impliquant le spectre initial des radionucléides et une vitesse de dépôt de 10^{-2} m.s^{-1} s'accorde avec les résultats des mesures effectuées sur les échantillons d'aliments. Les doses à la thyroïde estimées correspondent bien aux résultats de l'anthropogammamétrie. La dose à la thyroïde de 30 mSv pour les enfants et de 13 mSv pour les adultes semble pertinente.

III.6. Comparaison entre le taux d'iode mesuré et le taux d'iode calculé pour l'essai Centaure

Immédiatement après le passage du panache radioactif au-dessus de Tahiti, deux mesures représentatives de la radioactivité dans l'air ont été effectuées (activité déposée sur les filtres). L'activité moyenne volumique d'un des filtres utilisés pendant les retombées était 629 Bq.m^{-3} et l'activité volumique moyenne du deuxième filtre, 1180 Bq.m^{-3} , ce qui représente respectivement 2 % et 3 % de l'activité totale. Ces résultats s'accordent bien avec le pourcentage théorique d'activité de l'I-131 de 2 %, qui prend en compte la décroissance radioactive deux jours après l'essai.

III.7. Comparaison entre mesures et calculs

Le graphique ci-dessous permet une comparaison entre la part d'activité de l'I-131 et l'activité bêta total mesurée dans l'herbe après l'essai Centaure et calculée à l'aide des données concernant la décroissance de la base de données JEFF, en fonction du moment de l'arrivée du panache. Après 1 à 2 jours, les mesures et le calcul concordent.

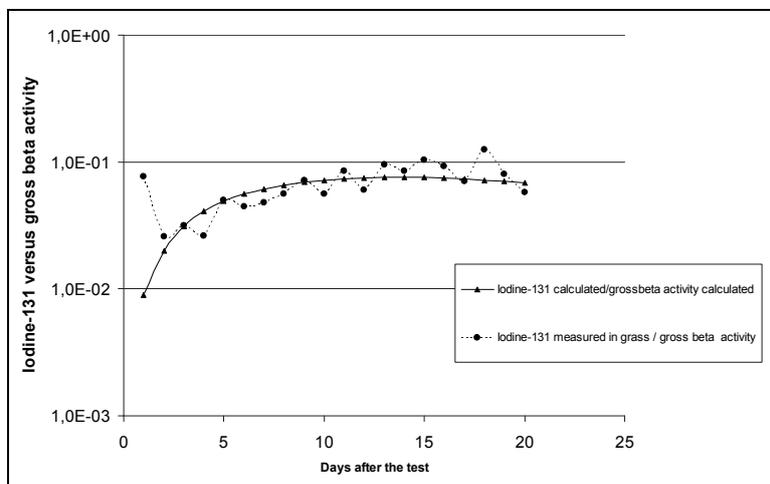


Fig. III.1 Part calculée et mesurée d'activité de l'I-131 dans l'activité bêta total déposée sur l'herbe, sur la durée.

III.8. Estimation de la dose due à l'ingestion après l'essai Rigel

Comme peu de mesures concernant l'essai Rigel dans les îles Gambier ou à Tureia étaient disponibles, des valeurs dérivées ont été estimées pour évaluer les doses dues à l'ingestion.

L'activité dans l'eau de boisson a été évaluée à partir de l'activité mesurée dans l'eau de pluie. Les mesures effectuées sur l'eau de pluie et l'eau de boisson à Tureia après les essais Arcturus et Encelade ont été utilisées pour calculer le rapport entre la radioactivité dans l'eau de pluie et la radioactivité dans l'eau de boisson. Ce rapport a servi de base pour évaluer l'activité dans l'eau de boisson après l'essai Rigel à Tureia et dans les îles Gambier.

La dose due à l'ingestion de produits de la mer aux îles Gambier et à Tureia a été calculée en utilisant des coefficients empiriques déduits à partir du rapport entre les dépôts et les doses dues à l'ingestion calculées pour les essais Aldébaran, Arcturus, Encelade et Phoebé. Le rapport entre le dépôt et la dose due à l'ingestion varie de $1,1 \times 10^{-7}$ (essai Phoebé) à $2,2 \times 10^{-6}$ (essai Arcturus). Les différences viennent des variations dues aux activités élevées dans les mollusques pour les essais Arcturus et Aldébaran.

III.9. Description de l'approvisionnement en eau dans les îles Gambier (juin 1966)

Le réseau de distribution d'eau de boisson à Rikitea est complexe. A l'origine, la population utilisait des puits creusés dans le sable de la zone côtière, qui atteignaient la nappe d'eau douce à une profondeur de 1 à 2 m. On connaissait également de petites sources dont les eaux s'infiltraient des rochers vers la plaine. Il reste un grand nombre de puits à Rikitea, dont certains sont remplis de roches, mais ne sont plus utilisés. Le toit de l'église de Rikitea, qui couvre une surface d'environ 900 m², a été équipé de gouttières sur sa face ouest pour

collecter l'eau de pluie et remplir une citerne. Ce réservoir, fissuré, n'est plus en service. On peut supposer que lorsque la citerne était utilisée, elle fournissait 800 à 900 m³ par an d'eau de pluie pour approvisionner la population en eau potable.

Le long de la piste qui monte en direction du plateau latéritique pour rejoindre Atituiti, trois petites sources sont exploitées à 30 ou 40 m d'altitude. L'eau atteint le sol dans deux bassins de captage consistant en deux cavités de 1,5 m × 2 m × 0,5 m, creusés à 5 m l'un de l'autre. Leurs murs sont recouverts de parpaings mal ajustés, si bien que la surface gondole. Le troisième bassin est mieux protégé car il est recouvert de dalles de béton. Trois conduites amènent l'eau à un collecteur enterré qui approvisionne un réservoir de 10 m³, en ciment, avec des planches dans la partie supérieure, qui a été bien construit et bien protégé. Le débit de ces réservoirs est faible, ils fournissent entre 300 et 400 L/h pendant la saison sèche.

Pendant quelques années, l'eau de Rikitea a été distribuée depuis le bassin de captage du cours d'eau de Gatavake. A une altitude proche de 165 m, trois branches principales sont retenues : un petit trou de 1 m² et de 0,30 m de profondeur, dans lequel les éléments solides se sédimentent, est percé sur un côté et la tête d'une conduite, équipée d'un filtre à l'extrémité, est logée dans cet orifice. Une conduite d'environ 1 km de long et 5 cm de diamètre traverse Gatavake pour atteindre un réservoir situé à 65 m d'altitude au-dessus du village de Rikitea. Ce réservoir, d'un volume global de 80 m³, est en ciment, avec des planches assemblées dans sa partie supérieure. Ce toit assure une protection efficace. Ce réservoir est relié à l'ancienne conduite qui dessert tout le village. Comme la conduite n'est pas accessible au niveau du réservoir, on ne peut pas mesurer directement son débit. La conduite capte toute l'eau de la rivière Gatavake pendant la saison sèche, mais pendant la saison des pluies, elle ne collecte qu'une fraction du volume total. On a estimé que le débit maximal était de 3 L/s.

Dans la partie nord du village, des bassins captent l'eau de deux petits cours d'eau, qui coulent de manière irrégulière et remplissent périodiquement des réservoirs en ciment de 10 à 15 m³, qui alimentent deux fontaines.

III.10. Scénario d'exposition de la population de Taravao

Les personnes vivant à Pirae, Hitiaa ou Mahina passaient 4 heures par jour sur le plateau de Taravao pour s'occuper du bétail. Pour évaluer la dose due à l'inhalation ou au panache, l'activité bêta total de l'air est calculée à partir de l'activité bêta total du dépôt, en utilisant une vitesse de dépôt. Cette vitesse dépend des conditions météorologiques, (présence ou absence de pluie).

Pour évaluer la dose externe due à l'irradiation, on a supposé que les personnes ne passaient que 4 heures par jour sur le plateau de Taravao. La dose externe évaluée pour les personnes travaillant à Taravao est ajoutée à celle reçue à leur domicile (pendant les deux tiers de la journée). Les doses maximales, exprimées en mSv, sont obtenues pour les personnes vivant à Hitiaa et travaillant sur le plateau de Taravao (voir tableau III.2).

III.11. Explication du rapport entre l'activité dans l'eau de pluie et l'activité dans l'eau de boisson (essai Rigel)

Les retombées du panache contaminé ont commencé sur les îles Gambier, 11 heures après l'essai Rigel et se sont arrêtées 14 heures après. Deux très faibles averses se sont produites pendant le passage du panache (5 minutes) et 5 heures après la fin du passage du panache. Par conséquent, l'activité mesurée dans l'eau de pluie est essentiellement due au lessivage du dépôt sec, qui s'est déposé sur la surface du pluviomètre.

Dans quelques maisons isolées, l'eau de boisson provenait de l'eau de pluie stockée dans des citernes. Ce n'est pas le cas à Mangareva où vit la majorité des habitants des îles Gambier. L'activité dans l'eau de boisson stockée dans les citernes s'explique par le lessivage par la pluie du dépôt sec qui se trouve sur les toits.

Mangareva et Tureia avaient des systèmes similaires pour collecter l'eau de boisson. Les rapports choisis pour calculer l'activité dans l'eau de boisson d'après l'activité dans l'eau de pluie à Mangareva étaient ceux calculés à partir des mesures d'activité dans l'eau de boisson et l'eau de pluie à Tureia suite aux essais Encelade et Arcturus.

Ces rapports, respectivement de 12 et 20 pour les deux essais, correspondent au facteur de dilution dans la citerne de l'eau de pluie contaminée par l'eau non contaminée, à la diminution de l'activité due à la décroissance radioactive pendant la période de consommation de l'eau, ainsi qu'à l'adsorption de radionucléides sur les parois de la citerne.

Tableau III.2. Dose efficace due à la radiation externe provenant du dépôt (mSv).

| Durée de l'intégration | Pirae | Mahina | Hitiaa | Plateau de Taravao (4 heures d'exposition par jour) | Total max* |
|------------------------|-------|--------|--------|---|------------|
| 1 jour | 0,007 | 0,05 | 0,15 | 0,14 | 0,26 |
| 2 jours | 0,013 | 0,09 | 0,26 | 0,24 | 0,45 |
| 1 semaine | 0,026 | 0,18 | 0,53 | 0,5 | 0,92 |
| 2 semaines | 0,033 | 0,24 | 0,71 | 0,66 | 1,23 |
| 1 mois | 0,040 | 0,30 | 0,91 | 0,84 | 1,57 |
| 6 mois | 0,053 | 0,38 | 1,15 | 1,06 | 1,98 |

* Le total maximal équivaut à la dose reçue à Taravao ajoutée à celle reçue à Hitiaa (20h à 24h), d'une valeur de 0,88.

Tableau III.3. Concentrations d'activité bêta total et d'activité de l'I-131 dans les aliments de Mangareva suite à l'essai Phoebé le 8 août 1971.

| Aliment | Date des mesures | β total | ^{131}I | $^{131}\text{I} / \beta$ total |
|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|
| Bénitier géant | 3 septembre 1971 | $1,80 \times 10^2$ | $3,9 \times 10^1$ | 21,7% |
| Bénitier géant | 25 août 1971 | $9,53 \times 10^2$ | $1,83 \times 10^2$ | 19,2% |
| Fafa | 23 août 1971 | $1,67 \times 10^4$ | $2,41 \times 10^3$ | 14,4% |
| Chou | 25 août 1971 | $2,59 \times 10^3$ | $3,00 \times 10^2$ | 11,6% |
| Turbo | 25 août 1971 | $5,08 \times 10^2$ | $5,58 \times 10^1$ | 11,0% |
| Fafa | 2 septembre 1971 | $3,84 \times 10^4$ | $3,22 \times 10^3$ | 8,4% |
| Salade | 16 août 1971 | $1,17 \times 10^5$ | $9,55 \times 10^3$ | 8,2% |
| Chou | 2 septembre 1971 | $2,63 \times 10^3$ | $2,02 \times 10^2$ | 7,7% |
| Turbo | 3 septembre 1971 | $2,49 \times 10^2$ | $1,32 \times 10^1$ | 5,3% |
| Salade (non lavée) | 2 septembre 1971 | $1,08 \times 10^4$ | $5,29 \times 10^2$ | 4,9% |

III.12. Explication du rapport entre l'activité de l'I-131 et l'activité bêta total dans le bénitier géant

Le tableau III.3 montre l'activité bêta total et l'activité de l'I-131 dans des aliments mesurés après l'essai Phoebé, exprimées en Bq.kg^{-1} . D'après les données de JEFF (fichier commun des données évaluées sur la fission et la fusion), le rapport entre l'activité de l'I-131 et l'activité bêta total est d'environ 10 %, une valeur qui semble cohérente compte tenu des mesures effectuées sur les échantillons de légumes et de turbo.

Ces mesures montrent que, le ratio entre l'activité due à l'I-131 et l'activité bêta total est plus important dans le bénitier, mollusque qui filtre de grandes quantités d'eau et incorpore

directement et rapidement les radionucléides présents dans l'eau de mer, que dans d'autres mollusques, comme le turbo, un mollusque brouteur, qui incorpore les radionucléides de manière indirecte, en ingérant des algues.

III.13. Composition isotopique de l'eau de citerne

On dispose de mesures d'activité bêta total et de spectrométrie gamma de l'eau de citerne à Tureia le 13 juillet 1971, après l'essai Encelade. L'activité de l'I-131 y est de 519 Bq.l^{-1} et l'activité bêta total de $4,5 \times 10^4 \text{ Bq.l}^{-1}$. La proportion d'I-131 dans l'activité bêta total est de 1,1 %.

Quinze heures après l'essai, c'est-à-dire au moment de l'arrivée du panache contaminé à Tureia, la proportion d'I-131 dans l'activité bêta total est de 0,53% d'après la base de données JEFF.

Le rapport entre l'activité relative de l'I-131 dans le dépôt et dans l'eau de citerne, qui correspond approximativement à un facteur 2, reflète la décroissance de l'activité bêta total entre le moment de l'arrivée du panache à Tureia et celui du prélèvement de l'eau. Ceci s'explique par le fait que, peu de temps après l'essai, l'activité bêta total diminue rapidement.

III.14. Mesures de contrôle de la radioactivité dans les aliments à Tahiti

Viande et œufs

En s'appuyant sur la mesure de l'activité du Zr-95 dans de la viande provenant du marché de Papeete, le 24 juillet 1971, l'activité bêta total est estimée à moins de 1000 Bq.kg^{-1} . Cette estimation a été utilisée pour trois lieux qui étaient caractérisés par des régimes alimentaires différents, liés au mode de vie local, urbain ou rural.

Des mesures sur les œufs à Mahina, Hitiaa et Teahupoo sont disponibles. L'hypothèse est faite que les œufs provenant de Teahupoo sont consommés par la population de Taravao, ceux provenant de Hitiaa par la population d'Hitiaa et ceux provenant de Mahina par la population de Pirae.

L'activité bêta total des œufs (2300 à 6500 Bq.kg^{-1}) est plus importante que dans la viande.

En raison des différences entre régimes alimentaires et de l'évolution estimée de l'activité sur le temps, la dose due à la consommation de viande est plus élevée que celle due à la consommation d'œufs.

Légumes

On dispose de résultats de mesures effectuées sur du « fafa » (sorte d'épinard) prélevé à Mahina, Paea et Teahupoo. On suppose que les légumes provenant de Paea sont consommés par la population de Pirae, ceux provenant d'Hitiaa par la population d'Hitiaa et ceux provenant de Teahupoo par la population de Taravao. L'activité bêta total varie entre $1,4 \times 10^5 \text{ Bq.kg}^{-1}$ à Teahupoo et $4,1 \times 10^5 \text{ Bq.kg}^{-1}$ à Hitiaa.

Le régime alimentaire est le même sur ces trois sites et on suppose qu'un jeune enfant mange 30 g de légumes par jour.

Poisson

D'après la mesure de l'activité du Zr-95 dans du poisson provenant du marché de Papeete le 25 juillet 1971, l'activité bêta total est estimée à 400 Bq.kg^{-1} . Cette valeur a été utilisée pour le calcul des doses relatives à trois localités caractérisées par des régimes alimentaires différents, liés au mode de vie local, urbain ou rural, sauf en ce qui concerne les jeunes enfants, qui sont supposés manger 100 g de poisson par jour dans ces trois localités (Pirae, Hitiaa et Taravao).

III.15. Approvisionnement eau à Tahiti

Au moment des essais, l'eau de boisson était fournie par des citernes à Pirae, Hitiaa et Taravao.

PUBLICATIONS UTILISÉES POUR RÉDIGER CETTE APPENDICE

L'ouvrage « La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie (2006) » (en français)

Rapport Aldébaran 2006 – *calcul de l'impact dosimétrique des retombées de l'essai ALDEBARAN sur les îles Gambier*

Rapport Centaure 2006 – *calcul de l'impact dosimétrique des retombées de l'essai CENTAURE à Tahiti*

Rapport Encelade 2006 – *calcul de l'impact dosimétrique des retombées de l'essai ENCELADE sur Tureia*

Rapport Phoebé 2006 – *calcul de l'impact dosimétrique des retombées de l'essai PHOEBE sur les îles Gambier*

GAMBIER – Cahiers du Pacifique N°18 Tomes 1 et 2 – Septembre 1974 – Fondation Singer Polignac-

ANNEXE I. MANDAT

Examen international de l'application des normes de sûreté internationales pour la protection radiologique de la population en Polynésie française

Mandat

1. Objectif de l'examen

L'examen fournira une évaluation indépendante de l'analyse radiologique des essais d'armes nucléaires français dans l'atmosphère en Polynésie française demandée par le Délégué à la Sûreté Nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la Défense (ci-après le DSND). Le Commissariat à l'énergie atomique (CEA/DAM⁷) et le ministère de la défense (DGA/DSCEN⁸) ont apporté leur soutien au DSND dans la réalisation de ce travail.

Cet examen se concentrera en particulier sur les méthodes et les résultats des évaluations de dose menées pour des « groupes critiques » de la population à une échelle régionale.

L'évaluation et les recommandations sur lesquelles débouchera cet examen s'appuieront sur les normes de sûreté pertinentes de l'AIEA et sur l'expertise combinée de l'équipe internationale concernant les bonnes pratiques à adopter dans des situations similaires.

Cette mission favorisera également l'échange de bonnes pratiques identifiées au cours de l'examen et fournira des informations en retour pour le développement des normes et recommandations internationales.

2. Champ d'action

En 2005, le ministre de la défense français a confié au DSND la responsabilité de réévaluer les analyses radiologiques des conséquences des essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère sur la population de Polynésie, menées de 1966 à 1974. Cette réévaluation, rédigée par le CEA/DAM et le DGA/DSCEN comportait une évaluation des données historiques et des estimations de dose effectuées au moment des essais en utilisant les méthodes et les paramètres internationaux actuellement en vigueur. La deuxième étape consistait à étendre les calculs en utilisant des barres d'erreur et des analyses de sensibilité et la troisième étape, à appliquer ces méthodes à la population la plus sensible à la radioactivité (c'est-à-dire les jeunes enfants) et à compléter les évaluations par des doses à la thyroïde.

Six essais d'armes en particulier furent inclus dans cet examen, ceux reconnus comme ayant potentiellement les conséquences radiologiques les plus importantes sur la population : Aldébaran, Rigel, Arcturus, Encelade, Phoebé et Centaure. Les résultats de ce réexamen ont été rendus publics en 2006, via la publication de l'ouvrage *La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie*.

En 2008, le ministre français de la défense a demandé que des études complémentaires soient menées, couvrant toute la période d'essais en surface sur toute la Polynésie française. Les études complémentaires ont été menées à bien par le CEA/DAM et le DGA/DSCEN.

⁷ Direction des Applications Militaires du Commissariat à l'Énergie Atomique.

⁸ Département de Suivi des Centres d'Expérimentations Nucléaires de la Direction Générale de l'Armement.

L'examen mené étudiera la pertinence de la méthodologie employée et l'exactitude des estimations de dose réalisées pendant les études de 2005 et 2008, à l'aide des normes de sûreté internationales et des bonnes pratiques utilisées de par le monde dans ce domaine. Le processus d'examen s'appuiera sur un large éventail d'opinions de professionnels, ainsi que, le cas échéant, sur des références à la documentation précise de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA). Des bonnes pratiques, qui vaudraient la peine d'être partagées à une plus grande échelle, seront identifiées.

3. Base de l'examen

L'examen, y compris la définition des questions clés et des conclusions, aura pour base un certain nombre de références, où seront également puisées des informations, notamment :

- Le livre La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie (2006) (Ministère de la défense) ;
- Les rapports scientifiques du CEA/DAM concernant les études de 2005 et 2008 ;
- Les documents de référence de l'AIEA, notamment les normes de sûreté et les rapports techniques et de sûreté (voir la section 8) ;
- La collection de rapports sur les évaluations radiologiques intitulée The Radiological Situation at the atolls of Mururoa and Fangataufa (1998) ;
- Les conférences de l'AIEA et d'autres rencontres et forums internationaux portant sur le domaine concerné ;
- Les rapports de l'UNSCEAR sur ce sujet ;
- Des informations techniques utiles, demandées au cours de l'examen ;

4. Modus operandi

Des coordinateurs seront désignés pour le DSND et l'AIEA.

Le coordinateur du DSND choisi aura pour mission de :

- représenter le DSND dans les relations avec le coordinateur de l'AIEA ;
- fournir tous les documents utiles au coordinateur de l'AIEA avant l'examen ;
- garantir que les questions pertinentes des examinateurs reçoivent des réponses, qui sont transmises en temps utile à l'AIEA ;
- prendre toutes les dispositions nécessaires avec le DSND pour le bon déroulement des activités liées à l'examen ;
- recueillir tous les commentaires de la partie française concernant le projet de rapport d'examen, les commentaires portant spécifiquement sur l'utilité des normes de sûreté et les commentaires généraux sur l'expérience de la mission ; et de
- participer en tant qu'observateur aux réunions organisées par l'AIEA dans le cadre de l'examen.

Le coordinateur de l'AIEA sera chargé de :

- s'accorder sur le mandat de l'AIEA avec le coordinateur du DSND ;
- assurer la liaison avec le coordinateur du DSND ; ainsi que de
- la coordination de toutes les activités de l'AIEA liées à la mission d'examen ; et
- la mise sur pied de l'équipe d'examineurs.

Le processus d'examen complet comporte cinq phases :

(a) Information initiale – Cette phase comprend la transmission des informations existantes par le coordinateur du DSND et leur remise par l'AIEA aux membres de l'équipe d'examineurs pour une évaluation préliminaire. Une copie des documents de l'AIEA utiles pour l'examen sera également distribuée à l'équipe (mai 2009).

(b) Réunion d'examen – Une réunion aura lieu à Paris pour permettre au DSND de présenter en détail les évaluations menées et donner aux membres de l'équipe l'occasion d'avoir des discussions techniques sur des points particuliers (c'est-à-dire que des réponses seront apportées aux questions soulevées par l'équipe), ainsi que des discussions avec le DSND et ses conseillers techniques du DGA/DSCEN et du CEA/DAM (septembre 2009).

(c) Première réunion de préparation du rapport – Une réunion se tiendra à Vienne pour permettre la rédaction d'un projet de rapport par l'AIEA et l'équipe d'experts. Des observateurs du DSND/CEA y participeront, afin d'apporter les clarifications qui pourraient leur être demandées au cours de la réunion et de faire des commentaires au nom du DSND et de ses conseillers techniques (décembre 2009/janvier 2010).

(d) Dernière réunion de préparation du rapport – Une réunion aura lieu à Vienne entre l'AIEA et l'équipe d'experts afin de rédiger la version finale du projet de rapport, qui répondra aux commentaires reçus de la partie française. Des observateurs envoyés par la partie française pourraient y participer si nécessaire (février/mars 2010).

(e) Réunion de présentation – Une réunion sera organisée à Paris pour que l'AIEA présente au DSND le projet de rapport final, qui comportera un résumé des travaux effectués au cours du processus d'examen, ainsi que ses résultats et conclusions (avril/mai 2010).

(f) Communication des résultats de l'examen – Le DSND est responsable de la communication des résultats de l'examen aux parties concernées et peut inviter l'AIEA à participer à des manifestations destinées à assurer la communication sur ce sujet.

(g) En accord avec le DSND, l'AIEA publiera un rapport sur la mission d'examen dans la collection des rapports d'évaluation radiologique, une fois achevée la présente mission d'examen.

5. Équipe d'experts

L'AIEA mettra sur pied une équipe d'experts internationaux pour procéder à l'examen, conformément au mandat négocié avec le DSND. Cette équipe comprendra des experts internationaux qualifiés et reconnus et des membres du personnel de l'AIEA ayant une expérience dans l'évaluation de l'impact radiologique, la radioécologie et la protection contre les radiations. L'AIEA demandera officiellement au DSND d'examiner et d'approuver la composition de l'équipe d'experts proposée avant de commencer la mission.

6. Rapport

Les résultats de l'examen seront communiqués dans un rapport final qui contiendra les conclusions de l'équipe d'examineurs. Ce rapport reflètera les avis des membres de l'équipe et pas nécessairement celui de leur organisation ou État membre respectifs ou de l'AIEA.

Le rapport ne sera à l'origine communiqué qu'à l'AIEA, aux membres de l'équipe d'examineurs, au DSND et à la mission permanente française. A ce stade, toute diffusion au-delà de ce cercle est laissée à la discrétion du DSND. Quatre-vingt-dix jours après la sortie du rapport final, son accès cessera automatiquement d'être restreint, à moins que le DSND demande qu'il en soit autrement. Dans l'intérêt de la transparence, le DSND est encouragé à autoriser la publication du rapport par l'AIEA.

7. Documents français soumis à examen

Le DSND doit mettre tout matériel de référence pertinent à la disposition de l'AIEA suffisamment à l'avance. La langue de travail de la mission sera l'anglais et l'AIEA se chargera de faire effectuer des traductions si nécessaires.

Seront soumis à examen les documents suivants :

- (a) les documents qui feront l'objet d'un examen par l'équipe d'experts ;
- (b) des documents complémentaires examinés et commentés pendant la mission ; et
- (c) d'autres documents nationaux pertinents devant être pris en considération.

8. Documents de référence de l'AIEA

Les normes de sûreté de l'AIEA serviront de cadre de référence principal pour l'évaluation, en particulier les textes suivants :

- Les principes fondamentaux de sûreté de l'AIEA – collection Normes de sûreté de l'AIEA n° SF-1, 2006 ;
- Normes fondamentales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements de l'AIEA – collection Normes de sûreté de l'AIEA n°115, 1996;
- Surveillance de l'environnement et des sources à des fins de radioprotection - collection Normes de sûreté de l'AIEA n° RS-G-1.8, 2005 ;
- Modèles généraux à utiliser pour l'évaluation de l'impact des rejets de substances radioactives dans l'environnement – collection Rapports de sûreté n°19, 2001.

9. Financement de l'examen

Les activités d'examen seront financées par le DSND et ses soutiens techniques, appelés ci-après « organisation hôte ». Le coût des services –(c'est-à-dire le coût des réunions et des visites liées au déroulement de l'examen) sera limité aux frais de transport et aux indemnités journalières de l'équipe (experts extérieurs et personnel de l'AIEA), auxquels s'ajoutent les honoraires des experts extérieurs, conformément aux procédures de l'AIEA. Les frais de publication officielle du rapport final de l'examen (voir section 6 ci-dessus) seront couverts par l'organisation hôte.

ACCORD DE FINANCEMENT

Par le présent accord, j'atteste que le financement de l'examen international de l'application des normes de sûreté internationales pour la protection du public contre les radiations en Polynésie française sera entièrement à la charge de l'organisation hôte, conformément aux dispositions ci-dessous.

(1) **Honoraires des experts** :

Les organisations réalisant l'examen, les organes de régulation et l'AIEA fournissent en règle générale les services de leurs consultants et/ou de leur personnel à titre gratuit à l'organisation hôte. S'il s'avère nécessaire de payer des droits ou des honoraires afin de se procurer une expertise utile au succès de l'examen, lesdits honoraires seront conformes aux procédures habituelles de l'AIEA et seront remboursés par l'organisation hôte.

(2) **Frais de transport** :

- (a) Les frais de transport des experts internationaux (y compris ceux du personnel de coordination de l'AIEA) seront couverts par l'organisation hôte.
- (b) L'AIEA fournira aux experts une subvention pour leur voyage, qu'ils auront la responsabilité d'organiser eux-mêmes ; le cas échéant, les frais d'annulation seront à leur charge. L'organisation hôte remboursera l'AIEA pour les dépenses engagées à ce titre.

(3) **Frais sur place** :

Les frais sur le site de la mission seront couverts comme suit :

L'organisation hôte couvrira les frais encourus sur place, c'est-à-dire le coût de l'hébergement et de la nourriture, ainsi que les dépenses annexes. Pour tenir cet engagement, l'AIEA verse à l'avance aux membres de l'équipe une indemnité journalière (per diem) calculée sur la base des dispositions financières des Nations unies en vigueur et est remboursée en dollars des Etats-Unis par l'organisation hôte. L'organisation hôte rembourse l'AIEA pour les frais encourus.

Dans tous les cas, l'organisation hôte accueillant une mission d'examen fournit : des moyens de transport sur place ; des services d'interprétation si nécessaire ; des locaux et des services administratifs, y compris du matériel de traitement de texte et de reprographie et des fournitures de bureau ; des salles de réunion ; et des espaces de bureaux. Des services de secrétariat doivent également être fournis par l'organisation hôte. Si l'organisation hôte n'est pas en mesure de recruter une personne compétente pour assurer le secrétariat, un secrétaire de l'AIEA peut être autorisé à se joindre à la mission, ses frais de transport et ses indemnités journalières étant alors couverts de la même manière que ceux des autres membres de l'équipe.

(4) **Réunion préparatoire** :

Tous les frais de transport et toutes les dépenses sur place des membres du personnel de l'AIEA assistant à la réunion préalable à la mission d'examen seront couverts par l'AIEA. Si d'autres missions préparatoires s'avèrent nécessaires à la demande de l'organisation hôte, les frais de transport et les dépenses sur place seront couverts par l'organisation hôte.

Déclaration :

Approuvé au nom de Marcel Jurien de La Gravière

Délégué à la Sûreté Nucléaire et à la radioprotection
pour les activités et installations intéressant la Défense

Signature _____

Date _____

Délégué à la Sûreté Nucléaire et à la radioprotection
pour les activités et installations intéressant la Défense

Signed _____



Date _____

21 juillet 2009

Remarque: Les signatures sont des copies des originaux dans la version anglaise

ANNEXE II. CURRICULUM VITAE DES EXAMINATEURS JUGÉS COMPÉTENTS PAR L'AIEA

Mikhail Balonov



M. Balonov est né à Leningrad, en URSS, et dirige actuellement le laboratoire de protection de l'Institut de radiohygiène de Saint Pétersbourg, en Russie. Il est professeur de radiobiologie (1999, Institut de radiohygiène, Saint Pétersbourg, Russie), docteur ès sciences en radiobiologie et radiohygiène (1986, Institut de biophysique, Moscou, URSS) ; docteur en biophysique, (1972, Institut de biophysique, Moscou, URSS), et titulaire d'une maîtrise en physique nucléaire (1967) de l'Institut polytechnique de Leningrad, (1961-1967, Leningrad, URSS).

Monsieur Balonov a plus de quarante années d'expérience professionnelle dans le domaine de la protection radiologique de l'Homme et de l'environnement, dont 14 ans dans les circonstances exceptionnelles de la protection de la population et de l'environnement suite à l'accident nucléaire de la centrale de Tchernobyl. Il peut faire valoir une expertise et une expérience sur le terrain dans le domaine de la mise en place des normes de sûreté radiologique, des règlements et des critères de contrôle de l'exposition du public et de la réhabilitation de l'environnement, ainsi que dans le domaine du contrôle de la radioactivité, de la modélisation et de l'évaluation des doses, de la radioécologie et de la reconstitution des doses. Il a mené à bien des évaluations des conséquences radiologiques des rejets dans l'environnement dus à l'exploitation régulière et aux accidents dans les installations nucléaires russes, y compris l'usine de Mayak, les sites d'essai de Semipalatinsk et de Novaya Zemlya, et la flotte nucléaire. Il a élaboré des règles pour l'exposition médicale. Au cours de cette expérience de plus de quarante années, il a passé douze ans (1988-2000) à la tête du département de radioécologie de l'Institut de radiohygiène de Saint Petersburg en Russie, ainsi que de la Commission de dosimétrie de l'exposition du public au sein du Conseil national de radioprotection et de mesure des rayonnements russe (1992-2000) et du ministère de la santé publique russe (1996-2000); sept ans (2000-2006) comme employé de l'AIEA et chef de l'unité de la sûreté des rejets radioactifs (2002-2006), section de la sûreté des déchets, et comme membre de la section de la sûreté radiologique en 1995. Il a défini des normes de sûreté et rédigé des rapports techniques sur le contrôle et le suivi de la radioactivité ambiante, ainsi que des radionucléides dans les aliments et l'eau; il a par ailleurs organisé de nombreuses réunions et formations scientifiques. M. Balonov a une expérience significative de coopération scientifique réussie dans le domaine de la protection radiologique du public et de l'environnement avec des institutions d'Europe de l'Ouest et de l'Est et des États-Unis. Il a été engagé dans des projets communs à long terme avec la Commission européenne dans le domaine de la dosimétrie environnementale, de la radioécologie, de la remédiation, de la reconstitution de dose, de l'évaluation des risques, de la modélisation assistée par ordinateur et des applications pour le système d'information géographique. Autres expériences significatives de M. Balonov : membre de la Commission internationale de la protection

radiologique, commission 2, depuis 2001 ; secrétaire scientifique du forum des Nations Unies sur Tchernobyl, 2003-2005 ; consultant pour le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, 2006-2008, et pour l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2008; membre de la Commission russe pour la protection contre les radiations depuis 1992, chef de sa commission "Doses de radiation de la population russe" entre 1992 et 2000; directeur du Conseil sur la dosimétrie d'exposition de la population du ministère de la santé publique russe, 1996-2000; représentant de la Russie au Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique (AMAP), section « Contamination radioactive de l'Arctique », 1994-2000 ; membre de l'Union internationale des radioécologistes depuis 1990 et de l'Association internationale de protection contre les radiations depuis 1995 ; membre du comité de l'ICRU (Commission internationale des unités et des mesures radiologiques) chargé du rapport sur les évaluations rétrospectives des expositions aux rayonnements ionisants (1998-1999); auteur d'une monographie intitulée "Dosimétrie et étalonnage du tritium", 1983 (en russe); éditeur du livre "Les documents de Tchernobyl", 1993, Research Enterprises, Richland, USA; a publié plus de 200 articles dans des revues et actes scientifiques (dont environ 100 en anglais), est détenteur de 5 brevets; a rédigé plus de 30 documents officiels (normes de sûreté radioactive, instructions, etc.); conseiller du comité scientifique SC64-19 du Conseil national de radioprotection et de mesure des rayonnements des États-Unis sur la reconstitution historique de dose (1995-1999); membre du comité éditorial du bulletin "Radiation et risque" et du journal "Radiohygiène", en Russie; conseiller international du journal de la protection radiologique, Royaume-Uni, depuis 1998; secrétaire scientifique, porte-parole, modérateur, membre des comités scientifiques et des comités d'organisation de nombreuses réunions et formations scientifiques nationales et internationales.

Andrew McEwan



Andrew McEwan a obtenu une licence (avec mention) de l'université de Canterbury en 1963, est docteur en physique médicale de l'université de Cambridge (1969) et possède un diplôme en administration de la santé de l'université Massey (1982). Il a été nommé docteur honoris causa en science par l'université de Canterbury en 2009 pour sa contribution considérable à la recherche internationale en physique radiologique et en sûreté radiologique dans les 40 dernières années.

Après avoir obtenu son diplôme, il a accepté un emploi au Laboratoire national d'étude des radiations (NRL) de Nouvelle-Zélande, auquel il est resté associé plus de 40 ans. Durant cette période passée au NRL, M. McEwan en a été le directeur pendant 13 ans, à partir de 1984, a été membre du Conseil consultatif de protection radiologique (1984-2002), a participé aux travaux d'une sous-commission du Comité atomique de Nouvelle-Zélande (1980-1986) qui a révisé les critères d'autorisation de mouillage pour les navires à propulsion nucléaire, a dirigé l'étude radiologique menée par le NRL sur l'île Christmas en 1981 et a été membre de la mission scientifique au Pacifique Sud pour l'atoll de Mururoa en 1983. Il a également exercé

une activité de conseil sur les questions de radiations non ionisantes (champs électromagnétiques ELF et RF) en tant que membre du Comité consultatif interorganisation entre 1989 et 2002 et en tant que membre de la commission sur les limites d'exposition aux rayonnements électromagnétiques de l'Association néo-zélandaise des normes, à partir de 1989.

De 1989 à 1994, il a été membre d'un panel consultatif d'experts internationaux qui a conseillé le gouvernement des îles Marshall à propos d'une étude radiologique à l'échelle nationale, ainsi que d'un groupe consultatif de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), qui a réexaminé la situation radiologique sur l'atoll de Bikini. De 1996 à 1998 il a été directeur d'un groupe de travail chargé de l'étude du statut radiologique des atolls de Mururoa et Fangataufa coordonnée par l'AIEA et, en 1999, il a été consultant de l'AIEA pour une évaluation du statut radiologique des anciens sites d'essais nucléaires français en Algérie. Il a également participé à de nombreuses missions d'examen par des pairs organisées par l'AIEA pour évaluer des infrastructures de protection contre les radiations, en particulier dans des pays asiatiques, ainsi qu'à de nombreuses formations pour des membres du personnel permanent de l'Agence.

De 1997 à 2004, M. McEwan a été membre d'un comité permanent de la Commission internationale de protection radiologique et de deux groupes de travail de la CIPR ; il est également membre de la Société de protection radiologique australienne (qu'il a présidée entre 2000 et 2002), ainsi que de la Société royale de Nouvelle-Zélande. Il a donné un cours de troisième cycle en physique radiologique à l'université de Canterbury et a écrit un ouvrage en 2004 intitulé Nuclear New Zealand : Sorting fact from fiction (Le nucléaire en Nouvelle-Zélande : fiction et réalité), dans lequel il étudie les données concernant les radiations et le nucléaire. Il est actuellement professeur associé au département de physique et d'astronomie de l'université de Canterbury.

Yasuhito Sasaki



M. Sasaki est né à Tokyo, au Japon. Il est diplômé de la Faculté de Médecine (maîtrise en 1963) et de l'Ecole de Sciences Médicales de l'Université de Tokyo (doctorat en 1968).

Il a reçu une formation en médecine interne, spécialité médecine nucléaire, puis a effectué une spécialisation en radiologie.

Il a été professeur associé à l'Ecole de Médecine de l'Université de St Marianna (1973-1981), professeur de radiologie à l'Ecole de Médecine de l'Université de Toho (1981-1985), professeur de médecine nucléaire à l'Ecole de Médecine de l'université Gunma (1985-1990) et professeur de radiologie à la Faculté de Médecine de l'Université de Tokyo (1990-1998).

M. Sasaki est ensuite passé à l'Institut National de Sciences Radiologiques (NIRS), dont il a été directeur général et président. Depuis 2006, il est professeur à l'Ecole de la Santé et du Bien-être de l'Université Internationale (IUHW). Il est directeur exécutif de l'Association Japonaise des Radioisotopes depuis mai 2008 (JRIA).

Il est considéré comme une figure de proue de la médecine nucléaire au Japon et est reconnu comme tel par les sociétés internationales de médecine nucléaire. Il a été président et directeur du conseil d'administration de la Société japonaise de médecine nucléaire. M. Sasaki a également été membre des Conseils Editoriaux du Journal Japonais de Médecine Nucléaire, du Journal de Médecine Nucléaire (Etats-Unis) et du Journal Européen de Médecine Nucléaire et d'Imagerie Moléculaire. C'est un membre éminent de la Société Latino-américaine de Médecine et de Biologie Nucléaires (ALASBIMN) et un membre correspondant de la Société Allemande de Médecine Nucléaire (DGN).

M. Sasaki a participé à de nombreuses actions nationales et internationales liées à la protection et à la sûreté radiologiques dans des organes gouvernementaux et non gouvernementaux.

Il a assumé les fonctions de président du Conseil des Radiations Japonais et du Comité pour le suivi médical des survivants de la bombe A, ainsi que celles de membre du comité d'Administration de la Fondation pour la Recherche sur les Effets des Radiations (RERF). Il a représenté le Japon auprès de l'UNSCEAR et a présidé ses 42^{ème} et 43^{ème} sessions. Il a été membre C3 et MC de la CIPR pendant 16 ans, jusqu'en juin 2009.

M. Sasaki a reçu le prix pour services rendus du président de la société de médecine nucléaire, a été décoré de l'ordre du trésor sacré, étoile d'or et d'argent en 2007 et a reçu les honneurs du premier ministre en 2008 pour avoir contribué à la prévention des catastrophes. Il a également reçu des prix de la Société japonaise de médecine nucléaire, de la Société de tomodensitométrie corporelle (magna cum laude), et de la Société de radiologie d'Amérique du Nord (cum laude).

M. Sasaki est marié, a deux fils, un petit-fils et une petite-fille.

F. Owen Hoffman



M. Hoffman a derrière lui une brillante carrière de plus de 38 ans dans le domaine de l'évaluation des risques des radionucléides et des produits chimiques pour les humains. Il a travaillé au département de protection de l'environnement de l'Institut pour la sûreté des réacteurs de Cologne, en Allemagne, et comme chercheur dans les sections Santé, Sûreté et Environnement du Laboratoire national d'Oak Ridge, Tennessee. Depuis 18 ans, il assume les fonctions de président et directeur du Centre d'analyse des risques SENES d'Oak Ridge (S.A.).

M. Hoffman a accumulé des expériences variées en ce qui concerne l'analyse du transport, de l'exposition et des risques environnementaux des radionucléides et a également élaboré et évalué des méthodes utilisées pour examiner et évaluer les risques pour la santé et l'environnement des rejets provenant des installations industrielles. M. Hoffman fait partie des premiers scientifiques à avoir appliqué le principe d'analyse de l'incertitude pour quantifier le degré de fiabilité des estimations de dose d'exposition à l'I-131. Il a dirigé les travaux de rédaction d'un guide international (AIEA, 1989) et d'un guide national (NCRP, 1996) sur l'utilisation de l'analyse quantitative du degré d'incertitude dans les évaluations environnementales, les reconstitutions de dose et l'analyse des risques. Il a été consultant pour l'Institut national du cancer (NCI) pendant les années 1980 pour l'application de l'analyse de l'incertitude dans les reconstitutions de dose menées par le NCI pour évaluer l'exposition à l'I-131 à l'échelle nationale liée aux retombées des essais dans le Nevada. Il a mené à bien des recherches sur le terrain dans le cadre de cette reconstitution de dose du NCI. Il a également été consultant pour le Conseil national de la recherche (NRC) à l'Institut de médecine (IOM) pour l'examen par le NRC du rapport final du NCI sur les expositions à l'I-131 à l'échelle nationale (IOM/NRC, 1999) et a expliqué en détail au Congrès l'importance pour la santé publique du rapport du NCI de 1997, ainsi que l'incertitude liée à la traduction des doses en une estimation quantitative des risques.

M. Hoffman est expert consultant pour le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants. Il est membre émérite du Conseil national de radioprotection et de mesure des rayonnements (NCRP) et membre correspondant de la Commission internationale de protection radiologique. M. Hoffman a été directeur scientifique à l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, chargé de l'utilisation des données sur les retombées à Tchernobyl pour la validation et l'évaluation des modèles d'exposition environnementale. Il est membre de la Société pour l'analyse des risques et a assuré la liaison entre celle-ci et le NCRP. Il est ancien membre du Comité consultatif sur les radiations du conseil scientifique consultatif de l'APE. Il a été conseiller pour des programmes de reconstitution de doses dirigés par les États du Tennessee et du Colorado, l'Institut national du cancer et le Centre pour le suivi et la prévention des maladies.

Il est également membre fondateur du Comité consultatif pour la recherche épidémiologique en lien avec l'énergie du ministère de la santé et des services sociaux des États-Unis (ACERER, 1991-2001). Ce comité conseille le ministre de la santé et des services sociaux en ce qui concerne la recherche pour la reconstitution de dose chez les travailleurs et le public potentiellement exposés à des radiations et des produits chimiques sur ou à proximité de sites dépendant du ministère de l'énergie sur tout le territoire des États-Unis. Il a été chargé de l'initiative globale de la S.A. SENES Oak Ridge pour le développement de versions en ligne du Programme de Radio-épidémiologie Interactif (IREP) de l'Institut National du Cancer et de l'Institut national pour la santé et la sécurité au travail, qui présente une estimation de la probabilité que l'exposition à des retombées d'essais d'armes nucléaires ou l'exposition aux radiations dans le cadre professionnel soient responsables de maladies.

ANNEXE III. HOMOLOGUES FRANÇAIS

| | | |
|--------------------------|---|--------------------------------------|
| M. de La Graviere | Délégué à la Sûreté Nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la Défense. | 1 ^{ère} et dernière réunion |
| M. Villeneuve | Conseiller du Délégué à la Sûreté Nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la Défense. | 1 ^{ère} et dernière réunion |
| Cl. Musa | Département de Suivi des Centres d'Expérimentation Nucléaires – Ministère de la Défense | 1 ^{ère} réunion |
| F. Poirrier | Département de Suivi des Centres d'Expérimentation Nucléaires – Ministère de la Défense | 1 ^{ère} et dernière réunion |
| D. Calmet | Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives/ Direction des Applications Militaires | toutes les réunions |
| D. Robeau* | Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives/ Direction des Applications Militaires | toutes les réunions |
| M. Monfort | Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives/ Direction des Applications Militaires | toutes les réunions |

* Coordinateur de l'examen pour le CEA/DAM.

ANNEXE IV. IAEA STAFF

Gerhard Pröhl

Gerhard Pröhl est diplômé de l'Université Technique de Munich en sciences de l'agriculture (licence en 1980 et doctorat en 1990). De 1981 à 2009, il a travaillé au Helmholtz Zentrum (qui portait le nom de « Centre national de recherche pour l'environnement et la santé » jusqu'à la fin de 2007), à l'institut de protection radiologique. Ses travaux comprennent des études expérimentales sur le transfert des radionucléides dans l'environnement, le développement et la validation de modèles pour estimer les expositions liées à des rejets accidentels de radionucléides, le développement de modèles d'évaluation de dose aux fins d'études à long terme sur la sûreté du traitement des déchets nucléaires et des reconstitutions de dose chez les populations vivant dans des zones contaminées par l'accident de Tchernobyl ou ayant été évacuées de ces zones. Il a été associé à un grand nombre de projets de recherche internationaux et nationaux et en a coordonné beaucoup. Pendant de nombreuses années, il a été membre des commissions «Radioécologie» et «Protection radiologique dans les installations nucléaires» de la Commission Allemande de Protection Radiologique. Il est membre de la Commission 5 de la CIPR «Protection de l'Environnement». Depuis 2009, Gerhard Pröhl travaille pour l'Agence Internationale de l'Energie Atomique ; il dirige l'Unité des Evaluations et de la Gestion de l'Environnement.

M. Diego Telleria (Coordinateur de l'examen pour l'AIEA)

Diego Telleria est diplômé de l'Université de Buenos Aires en sciences de l'atmosphère et de l'environnement et a effectué des études supérieures en sûreté nucléaire et protection radiologique. Il dispose de 21 ans d'expérience dans le domaine du nucléaire. En 1987, il a commencé à travailler à la Commission Nationale de l'Energie Atomique en Argentine, dans le domaine de l'impact radiologique sur la population et l'environnement. Au cours de l'année 1993, il a mené des études poussées sur l'évaluation de l'impact radiologique sur l'environnement et sur l'estimation des risques au moyen de probabilités au Conseil National de Protection Radiologique (NRPB) au Royaume-Uni. En 1994, il a été nommé directeur du Département de Sûreté Nucléaire et Radiologique de l'Autorité de Régulation Nucléaire d'Argentine, où il était chargé des évaluations de la sûreté ainsi que de l'autorisation et de l'inspection des installations nucléaires et radioactives. Depuis 2005, M. Telleria a travaillé pour l'Unité de l'Evaluation et de la Gestion des Rejets dans l'Environnement, au sein de la Section de la Sûreté des Déchets et Environnementale de l'AIEA. Entre autres activités, il a participé en tant que membre de l'AIEA à la mise en place d'examens par des pairs de l'évaluation de l'impact radiologique sur l'environnement de pratiques actuelles, comme l'exploitation d'installations nucléaires, et de pratiques passées ayant laissé des résidus radioactifs dans l'environnement, comme celles liées aux essais atomiques et à l'utilisation d'uranium appauvri dans les armes.

