

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Evaluation de l'exposition radiologique des populations de Tureia, des Gambier et de Tahiti aux retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires entre 1975 et 1981

Rapport IRSN/2019-00498

Pôle Santé et Environnement

Table des Matières

TABLE DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX	3
RESUME	6
1 INTRODUCTION	8
2 ORIGINE DES RADIONUCLEIDES PRESENTS DANS L'ENVIRONNEMENT POLYNESIEN SUR LA PERIODE 1975-1981 ET VOIES D'EXPOSITION DES POPULATIONS	11
3 ESTIMATION DES DOSES EFFICACES ANNUELLES ENGAGEES LIEES A L'INGESTION DE DENREES ALIMENTAIRES	13
3.1 Données utilisées et éléments méthodologiques	13
3.1.1 Données du SMCB.....	13
3.1.2 Cas du tritium et du carbone 14	13
3.1.3 Cas du plutonium.....	14
3.1.4 Cas de l'eau de boisson	15
3.1.5 Rations alimentaires et facteurs de dose par unité d'incorporation	15
3.2 Activités massiques et volumiques des denrées alimentaires produites sur les six localités retenues pour cette étude	19
3.3 Doses efficaces liées à l'ingestion de denrées par des adultes et des enfants âgés de plus d'un an résidant en Polynésie Française entre 1975 et 1981.....	24
3.3.1 Comparaison des doses par ingestion suivant l'âge	24
3.3.2 Comparaison des doses estimées pour les adultes suivant la ration alimentaire utilisée	27
3.3.3 Comparaison des doses estimées pour les adultes suivant les différentes localités	27
3.3.4 Contribution des radionucléides aux doses par ingestion.....	28
3.3.5 Comparaison des doses estimées dans cette étude et celles estimées par l'UNSCEAR pour l'hémisphère sud	29
4 ESTIMATION DES DOSES EFFICACES ANNUELLES ENGAGEES LIEES A L'INHALATION DES RADIONUCLEIDES DANS L'AIR	29
4.1 Données utilisées et éléments méthodologiques	29
4.1.1 Données disponibles acquises par le LESE à partir de 1970	29

4.1.2	Données reconstituées par l'IRSN sur la base des mesures disponibles.....	30
4.1.3	Données complémentaires acquises par l'IRSN pour la présente étude	31
4.1.4	Représentativité pour l'ensemble de la Polynésie française des activités mesurées dans l'air sur Tahiti	32
4.1.5	Débits respiratoires et facteurs de dose par unité d'incorporation.....	32
4.2	Doses efficaces liées à l'inhalation de radionucléides pour les résidents en Polynésie Française entre 1975 et 1981	33
5	ESTIMATION DES DOSES EFFICACES ANNUELLES LIEES A L'EXPOSITION EXTERNE AUX DEPOTS DE CESIUM 137	34
6	DOSES EFFICACES ANNUELLES TOTALES LIEES AUX RETOMBÉES DES ESSAIS ATMOSPHERIQUES D'ARMES NUCLEAIRES	35
6.1	Doses efficaces annuelles totales entre 1975 et 1981.....	35
6.2	Mise en perspective des doses calculées dans le cadre de cette étude et de celles calculées postérieurement à 1981	39
7	CONCLUSION.....	41
	REFERENCES	42

Table des illustrations et des tableaux

Illustrations

Figure 1 - Localités retenues dans cette étude. Les communes de Papeete, Teahupoo, Paea et d'Hitiaa sont indiquées par des croix rouges sur la carte de Tahiti en haut. Tahiti, Tureia et les Gambier sont cerclées sur la carte de la Polynésie française en bas. Les hauteurs de pluie moyennes annuelles sur Tahiti issues des données journalières relevées par Météo France entre 1967 et 1975 sont également indiquées sur la carte de Tahiti.	10
Figure 2 - Activités massiques du césium 137 mesurées dans les noix de coco (coprah et eau de coco), du strontium 90 dans le coprah et du cobalt 60 dans la chair de bénitier (Bq/kg frais).	21
Figure 3 - Moyennes annuelles des activités massiques du césium 137 mesurées par le SMCB dans les denrées produites sur les six localités de Polynésie française sélectionnées pour cette étude (Bq/kg frais).	22
Figure 4 - Moyennes annuelles des activités massiques du strontium 90 mesurées par le SMCB dans les denrées produites sur les six localités de Polynésie française sélectionnées pour cette étude (Bq/kg frais).	23
Figure 5 - Moyennes annuelles des activités massiques du cobalt 60 mesurées par le SMCB dans des poissons de lagon et dans la chair de bénitier sur les six localités de Polynésie française sélectionnées pour cette étude (Bq/kg frais).	24
Figure 6 - Doses efficaces annuelles engagées, en μSv , dues à l'ingestion de denrées locales pour les adultes vivant dans les six sites étudiés entre 1975 et 1981, calculées avec les rations alimentaires de 1975 et de 1982.	25
Figure 8 - Doses efficaces annuelles engagées, en μSv , dues à l'ingestion de denrées locales pour les adultes et les enfants vivant à Hitiaa, à Paea ou à Teahupoo entre 1975 et 1981, calculées avec les rations alimentaires de 1975 et de 1982.	26
Figure 9 - Contributions des différentes denrées (ration 1975) ou catégories de denrées aux doses efficaces par ingestion potentiellement reçues par des adultes ayant résidé en Polynésie française en 1978.	27
Figure 10 - Activités volumiques des principaux produits de fission émetteurs gamma mesurés sur des prélèvements d'aérosols prélevés sur filtres entre début 1974 et début 1982 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).	30
Figure 11 - Fréquence de la détection des produits de fission émetteurs gamma dans les aérosols prélevés à Mahina (Tahiti) entre 1975 et 1981.	30
Figure 12 - Activités volumiques de l'air ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) des radionucléides émetteurs gamma dans les aérosols prélevés entre le 30 septembre 1974 et le 31 octobre 1975. Les points représentent les valeurs mesurées avant le 20 novembre 1974 et à partir du 20 avril 1975.	31

Figure 13 - Activités volumiques ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) des radionucléides mesurés en 2019 sur des aérosols prélevés sur filtres à Mahina entre 1975 et 1981.	32
Figure 14 - Dose annuelle par inhalation pour les adultes résidants en Polynésie entre 1975 et 1981 (triangles verts). Les contributions des produits de fission et des isotopes (^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu et ^{241}Pu) du plutonium sont indiquées respectivement par les losanges bleus et les carrés rouges.	33
Figure 15 - Dose annuelle par inhalation pour les adultes et les enfants résidants en Polynésie entre 1975 et 1981.....	34
Figure 16 - Expositions annuelles ajoutées par les retombées radioactives des essais atmosphériques pour les adultes de Tureia, des Gambier et des quatre localités de Tahiti entre 1975 et 1981 (ration alimentaire de 1975 pour la dose par ingestion).....	36
Figure 17 - Expositions annuelles ajoutées par les retombées radioactives des essais atmosphériques pour les adultes et les enfants âgés de plus d'un an de Tureia et des Gambier entre 1975 et 1981 (ration alimentaire de 1975 pour la dose par ingestion).	38
Figure 18 - Expositions annuelles ajoutées par les retombées radioactives des essais atmosphériques pour les adultes et les enfants âgés de plus d'un an des quatre localités de Tahiti entre 1975 et 1981 (ration alimentaire de 1975 pour la dose par ingestion).	38
Figure 19 - Evolution dans le temps depuis 1975 des doses efficaces annuelles des populations adultes des six localités.....	40

Tableaux

Tableau 1 - Voies d'exposition des populations aux retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et principaux radionucléides contributeurs pour l'année 1975 d'après l'UNSCEAR [7].	12
Tableau 2 - Rations alimentaires (kg ou L par an) en 1975 et en 1982 pour les six localités. L'écart observé dans les quantités de denrées solides annuellement consommées entre les rations de 1975 et 1982 s'explique par le fait que la ration de 1982 fait une large part aux denrées importées. Pour cette étude, seules les consommations de denrées locales sont considérées dans l'objectif d'évaluer des doses dues aux retombées des essais nucléaires sur la Polynésie.	17
Tableau 3 - Ratios de quantités consommées enfants/adultes pour différentes classes d'âges, déduits de l'enquête INCA3 (d'après [31]), proposés par l'AIEA [33] et issus de l'enquête alimentaire effectuée sur Tahiti par le CEA/IPSN entre 1980 et 1982 [34].	18
Tableau 3 - Gammes des contributions (en %) des radionucléides aux doses efficaces par ingestion (ration 1975) potentiellement reçues par des adultes ayant résidé en Polynésie française entre 1975 et 1981.	28
Tableau 5 - Expositions annuelles, en μSv , ajoutées par les retombées des essais nucléaires entre 1975 et 1981 pour les adultes de Tureia.	36
Tableau 6 - Expositions annuelles, en μSv , ajoutées par les retombées des essais nucléaires entre 1975 et 1981 pour les adultes des Gambier.	36

Résumé

En réponse à une demande du CIVEN, l'IRSN a estimé les doses efficaces annuelles pour les adultes et les enfants, liées aux retombées globales des essais atmosphériques d'armes nucléaires, potentiellement reçues par les populations résidentes aux Gambier, à Tureia et dans quatre communes de Tahiti (Papeete, Hitiaa, Paea et Teahupoo) entre 1975 et 1981. Le choix de ces îles et atolls était fondé sur des considérations démographiques d'une part (Tahiti étant l'île la plus peuplée de la Polynésie française) et géographiques d'autre part (Tureia et les Gambiers étant des proches de la zone d'essais ou de la trajectoire théorique des panaches troposphériques).

Les doses efficaces annuellement engagées dues à l'ingestion de denrées produites localement ont été estimées principalement sur la base des résultats d'analyse par spectrométrie gamma et de strontium 90 effectuées par le Service mixte de contrôle biologique (SMCB) dans des échantillons des principales denrées produites et consommées dans ces localités ; les teneurs en plutonium des denrées, non mesurées, ont été déduites de celles des sols ou des eaux marines au moyen de facteurs de transfert. La dose par incorporation de carbone 14 retenue est la moyenne mondiale estimée par l'UNSCEAR entre 1975 et 1981 ; la contribution du tritium a été considérée comme négligeable. Les calculs ont été effectués avec deux rations alimentaires différentes : l'une est la ration utilisée depuis 1982 par l'IPSN puis l'IRSN qui fait une large part à la consommation de denrées importées, l'autre est celle utilisée par le SMCB de 1975 à 1978 et reprise au milieu des années 2000 par le Ministère de la Défense pour ses évaluations dosimétriques relatives aux conséquences de certains essais, qui considère une plus grande consommation de denrées locales. Les rations alimentaires pour les enfants des quatre classes d'âges retenues par la réglementation, ont été déduites de celles des adultes par application de ratios entre les consommations des enfants et celles des adultes, issus de l'enquête alimentaire INCA3 de l'ANSES. Les doses par ingestion ainsi calculées sont comprises entre 6 et 65 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour les adultes, et entre 5 et 45 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour les enfants (toutes classes d'âges confondues). La variabilité de ces estimations est le reflet, d'une part des activités massives et volumiques des radionucléides mesurés dans les denrées alimentaires, et d'autre part des rations alimentaires utilisées. Ces doses sont principalement attribuables au césium 137, au carbone 14 et au strontium 90, ainsi qu'au cérium 144 dans le cas de Tureia. Pour les adultes comme pour les enfants, une diminution des doses estimées est observée entre 1975-76 et 1981 ; elle atteint un facteur 2 pour les localités de Tahiti-Hitiaa et de Tureia ; elle est de l'ordre de 30% pour les quatre autres localités.

L'exposition externe a été évaluée à partir des dépôts surfaciques de césium 137 dont les niveaux, sur la période 1975-1981, ont été calculés rétrospectivement à partir de mesures effectuées en 1982 (pour Tureia) et en 2017-2018 pour les îles hautes (Tahiti et Gambier). La dose efficace par exposition externe la plus élevée est obtenue aux Gambier, 13,1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, et la plus faible à Tureia, 2,7 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

Les doses efficaces annuellement engagées liées à l'inhalation des radionucléides présents dans l'air ont été calculées à partir des activités des produits de fission émetteurs gamma mesurés sur les filtres d'aérosols prélevés à Mahina (Tahiti) entre 1975 et 1981. Les activités du strontium 90 et des isotopes du plutonium n'ayant pas été mesurées à l'époque, l'IRSN a analysé en 2019 huit de ces filtres qui avaient été conservés. Ces activités volumiques mesurées sont considérées comme représentatives des concentrations dans l'air à l'échelle de la Polynésie française pour des retombées d'origines quasi-exclusivement stratosphériques à partir de 1975. Inférieures à 0,2 μSv en 1975 et diminuant vers une valeur dix fois plus faible en 1981, les doses dues à l'inhalation ainsi estimées pour les adultes sont négligeables au regard de celles liées à l'ingestion de denrées et à l'exposition externe ; les isotopes du plutonium en sont les principaux contributeurs (40 à

90%) ainsi que le cérium 144 (6 à 16%) et le ruthénium 106 (4 à 13%). Les doses efficaces dues à l'inhalation sont plus faibles pour les enfants que pour les adultes (les coefficients de dose par unité d'incorporation, plus élevés pour les enfants que pour l'adulte, ne compensent pas complètement le fait que les enfants ont des débits respiratoires plus faibles que celui d'un adulte).

Les doses efficaces totales potentiellement reçues par un adulte ayant résidé dans une des six localités entre 1975 et 1981, et résultant des trois voies d'expositions précédentes, sont comprises entre 18 et 68 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ quelle que soit la ration alimentaire, avec des valeurs environ deux fois à trois fois plus élevées à Tureia sur l'ensemble de la période et deux fois plus élevées à Hitiaa durant les années 1975-1976 que pour les trois autres sites de Tahiti et les Gambier. Elles sont très majoritairement dues à l'ingestion de denrées locales sauf pour les Gambier où l'exposition externe contribue pratiquement autant que l'exposition par ingestion à la dose totale. Pour les enfants, les doses efficaces totales estimées sont pour la plupart très proches de celles des adultes. Pour la classe d'âges des 12-17 ans ayant résidé à Tahiti, elles peuvent être légèrement supérieures à celles des adultes, mais n'excèdent pas 49 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

Les estimations dosimétriques effectuées dans cette étude sont dans une large mesure basées sur des résultats de mesure et partant, aussi réalistes que possible. Lorsque des hypothèses ou des choix méthodologiques ont été faits, ils l'ont été en préférant ceux qui conduisent à une majoration des expositions. Les commentaires sur les doses estimées et notamment sur leurs composantes (contributions des radionucléides, des voies d'exposition, des éléments de scénario d'exposition...) ont été volontairement développés dans ce rapport de manière à permettre au lecteur d'identifier les choix ou paramètres les plus déterminants. Ainsi, parmi les choix d'expert les plus impactants sur les résultats de cette étude, figurent en premier lieu les rations alimentaires (pour les doses par ingestion) et la répartition du césium dans la profondeur des sols (pour les doses externes). La ration alimentaire dite « de 1975 » et plus particulièrement celle utilisée pour estimer les doses dans les communes rurales de Tahiti, illustre le souci de majoration de l'IRSN pour cette étude ; la quantité totale de denrées solides d'origine locale consommée y est élevée alors que de nombreux produits comme les dérivés céréaliers (pain, pâtes, riz...) n'y sont pas considérés car nécessairement importés en Polynésie. De même, dans le cas de l'exposition externe, le fait de considérer que le césium 137 était, entre 1975 et 1981, intégralement contenu dans le premier centimètre à la surface des sols est un choix vraisemblablement très majorant. Dans le cas par exemple des Gambier, pour lesquels la dose externe contribue à plus de 50% de la dose totale, ce choix pourrait correspondre à une majoration de quelques dizaines de pour cent des doses totales estimées pour les habitants de cet archipel.

Il convient de souligner que les évaluations faites dans le cadre de cette étude, sur la période 1975-1981, sont cohérentes avec celles effectuées par l'IPSN (puis l'IRSN) à partir de 1982.

Il convient également de noter que les résultats de mesure utilisés dans la présente étude ne permettent pas de distinguer les apports liés aux retombées des essais nucléaires français en Polynésie, de ceux liés à l'ensemble des essais atmosphériques d'armes nucléaires effectués par ailleurs par les USA, l'URSS, le Royaume-Uni, la France et la Chine.

1 INTRODUCTION

Le Comité d'indemnisation des victimes des essais nucléaires (CIVEN) a demandé par courrier à l'IRSN [1] de réaliser une évaluation des doses efficaces potentiellement reçues par les populations de Polynésie française, consécutives aux retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires, pour la période 1975-1981.

Ce courrier précise que, dans l'exercice de ses missions, le CIVEN se heurte à un manque de données pour la reconnaissance de la qualité de victimes des essais nucléaires français en Polynésie française. En effet, pour la période des essais atmosphériques, jusqu'en 1974 inclus, le CIVEN dispose des tableaux de doses efficaces engagées figurant dans l'étude publiée par le ministère de la défense en 2006 [2] dont les conclusions ont été reprises et validées par une expertise de l'AIEA réalisée de septembre 2009 à juillet 2010 [3]. Pour la période de 1982 à 2014, le rapport de l'IRSN intitulé « Bilan de la surveillance de la radioactivité en Polynésie française en 2014 » [4] et ses annexes, fournit pour les adultes et pour les enfants, par archipel, l'évolution des doses efficaces engagées.

L'IRSN s'est donc attaché à recenser les données disponibles et celles qu'il conviendrait de compléter pour pouvoir fournir au CIVEN une évaluation de doses efficaces potentiellement reçues par les populations de Polynésie française pour la période 1975-1981 consécutives aux retombées globales¹ des essais atmosphériques d'armes nucléaires. D'un commun accord avec le CIVEN, l'IRSN a limité son étude aux adultes et aux enfants ayant résidé aux Gambier, à Tureia et dans quatre communes de Tahiti (Papeete, Hitiaa, Paea et Teahupoo ; [figure 1](#)) durant cette période. Le choix de ces îles et atolls était fondé sur des considérations démographiques d'une part (Tahiti étant l'île la plus peuplée de la Polynésie française) et géographiques d'autre part (Tureia et les Gambiers étant des proches de la zone d'essais ou de la trajectoire théorique des panaches troposphériques).

Pour effectuer ces estimations de dose, l'IRSN s'est principalement appuyé sur des résultats de mesure obtenus dans le cadre de la surveillance de l'environnement effectuée sur la période d'étude, de 1975 à 1981. Depuis le début des essais atmosphériques français, la surveillance de l'environnement a été effectuée par trois principaux organismes :

- le Service mixte de contrôle biologique (SMCB) de la Direction des centres d'expérimentations nucléaires (DIRCEN) pour la surveillance des denrées alimentaires;
- le Service mixte de sécurité radiologique (SMSR) de la DIRCEN pour la surveillance de l'environnement physique (air, eau, sol) ;
- le Laboratoire d'études et de surveillance de l'Environnement (LESE) du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) puis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) à qui ont été confiées les activités de surveillance alimentaire et des milieux physiques à partir de 1982.

A partir de 1983, les résultats du SMCB et du SMSR ont été transmis au LESE et un rapport conjoint IPSN - DIRCEN (SMSR et SMCB) sur l'évolution de la surveillance entre 1975 et 1982 a été édité en 1984 [5 et 6]. Les résultats des mesures des échantillons biologiques (denrées alimentaires) sur cette période y sont présentés et les données détaillées, déclassifiées en 2013, sont accessibles dans les rapports du SMCB.

Depuis 1971, le LESE a effectué des prélèvements d'aérosols sur filtre à Tahiti avec une station à grand débit d'aspiration. Les analyses ont été effectuées par le laboratoire de métrologie de l'IRSN à Orsay.

¹ On désigne par retombées globales les retombées liées à l'ensemble des essais atmosphériques d'armes nucléaires effectués par les Etats-Unis, l'Union Soviétique, le Royaume-Uni, la France et la Chine. Les retombées de plutonium 238 liées à la désintégration du satellite américain SNAP-9A en 1964 sont également prises en compte dans ce terme.

Ce rapport rappelle tout d'abord l'origine de la radioactivité artificielle présente dans l'environnement polynésien entre 1975 et 1981 ainsi que les voies d'exposition des populations qui lui sont associées. Pour chacune des trois voies d'exposition étudiées (incorporation de radionucléides par ingestion de denrées, exposition externe aux dépôts radioactifs et inhalation des radionucléides présents dans l'air), les données et la méthodologie utilisées pour l'évaluation des doses potentiellement reçues par des personnes ayant résidé entre 1975 et 1981 dans les six localités retenues dans cette étude sont présentées. Les estimations de doses sont ensuite commentées.

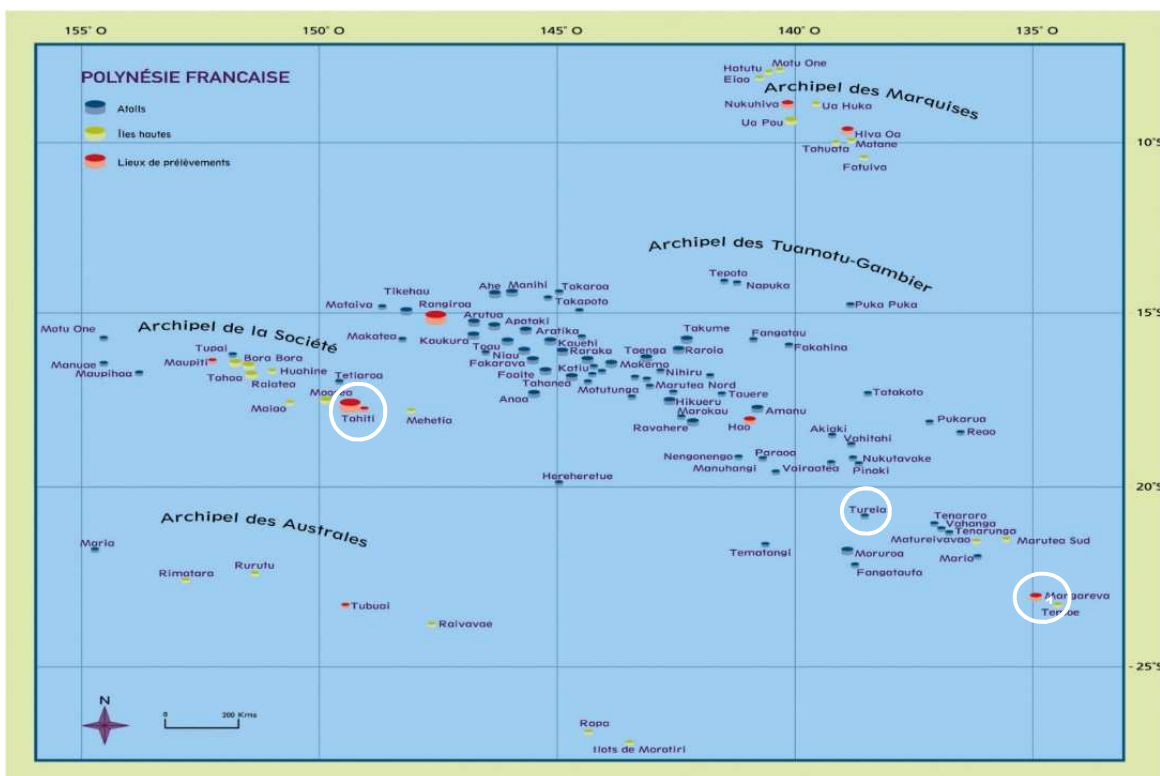


Figure 1 - Localités retenues dans cette étude. Les communes de Papeete, Teahupoo, Paea et d'Hitiia sont indiquées par des croix rouges sur la carte de Tahiti en haut. Tahiti, Tureia et les Gambier sont cerclées sur la carte de la Polynésie française en bas. Les hauteurs de pluie moyennes annuelles sur Tahiti issues des données journalières relevées par Météo France entre 1967 et 1975 sont également indiquées sur la carte de Tahiti.

2 ORIGINE DES RADIONUCLÉIDES PRESENTS DANS L'ENVIRONNEMENT POLYNESIEN SUR LA PERIODE 1975-1981 ET VOIES D'EXPOSITION DES POPULATIONS

A partir de 1975, les radionucléides issus des essais atmosphériques d'armes nucléaires encore présents dans l'environnement polynésien proviennent principalement :

- des stocks de radionucléides qui se sont constitués dans les sols et dans les eaux marines durant toute la période des essais nucléaires mondiaux, et principalement entre 1953 et 1963, année du moratoire américano-soviétique pour un arrêt conjoint des essais aériens ;
- des retombées aériennes résiduelles de l'ensemble des essais nucléaires atmosphériques effectués par les USA, l'URSS, le Royaume-Uni, la Chine et la France jusqu'en septembre 1974, date du dernier essai atmosphérique français, ainsi que de traces liées aux essais chinois qui ont perduré jusqu'en octobre 1980 ;
- des retombées liées à la désintégration dans l'atmosphère du satellite américain SNAP-9A en 1964 pour une part du plutonium 238.

Les radionucléides concernés sont donc principalement des radionucléides dont les périodes radioactives sont d'au moins quelques années. Toutefois, en 1975, et jusqu'en 1977-1978 pour certains organismes marins autour de Tureia et des Gambier, quelques radionucléides de période de l'ordre de quelques mois (comme le cérium 144 ou le ruthénium 106, voir [tableau 1](#)), sont encore imputables à la campagne d'essais français de 1974, voire à celle de 1973. La présence ponctuelle de radionucléides de période radioactive plus courte comme le zirconium 95 (période de 2 mois) ou le cérium 141 (période de 1 mois), notamment dans l'air en très faibles quantités et durant l'ensemble de la période 1975-1981, est liée principalement aux essais chinois.

Plusieurs pays ont estimé les retombées et les conséquences des essais nucléaires sur leur territoire. L'UNSCEAR a effectué un bilan à l'échelle mondiale dans son rapport de 2000 [7]. Les retombées sur la France métropolitaine et les doses associées ont été estimées au début des années 2000 par l'IRSN sur la base des nombreuses mesures effectuées depuis 1961 par le Service central de protection contre les rayonnements ionisants (SCPRI) [8, 9, 10].

Toutes les estimations montrent que l'ingestion de denrées contaminées et l'exposition externe aux radionucléides présents dans les sols ont été les voies d'atteinte prépondérantes des populations, loin devant l'exposition par inhalation des radionucléides présents dans l'air, l'exposition externe à ces radionucléides dans l'air étant négligeable. Ainsi, l'UNSCEAR estime à 54% la contribution de l'ingestion de denrées à la dose efficace reçue par les populations de l'hémisphère sud en 1975, à 41% celle de l'exposition externe due aux dépôts aux sols et à seulement 5% celle de l'inhalation. Le tableau 1 présente les principaux radionucléides qui ont contribué d'après l'UNSCEAR, à chacune de ces trois voies d'exposition pour la population mondiale en 1975. La contribution d'un radionucléide à une voie d'exposition est liée à son abondance dans les différentes composantes de l'environnement et à sa radiotoxicité, exprimée au travers d'un facteur de dose.

Ainsi, parmi les très nombreux radionucléides qui ont été émis dans l'air lors de l'ensemble des retombées des essais nucléaires atmosphériques de 1945 à 1980, seuls une douzaine ont pu contribuer significativement aux expositions des

populations polynésiennes sur la période 1975-1981. En effet le [tableau 1](#) montre que les radionucléides mentionnés contribuent à 96% de la dose par inhalation, à 99% de la dose par ingestion et à 89% de la dose par exposition externe.

Par ailleurs, compte tenu de leur comportement en milieu marin, le cobalt 60 (période radioactive de 5,3 ans), l'argent 110m (période radioactive de 250 jours), le zinc 65 (période radioactive de 244 jours) et le zirconium 95 (période radioactive de 64 jours) se concentrent dans des mollusques régulièrement consommés en Polynésie comme le bénitier ou le turbo. Aussi, les radionucléides pris en compte dans la présente étude sont ceux du [tableau 1](#) complétés par ces quatre radionucléides pour l'ingestion de denrées marines.

Voie d'exposition	radionucléide	Période radioactive	Contribution à chaque voie d'exposition
Ingestion de denrées	Carbone 14 (^{14}C)	5700 ans	44%
	Strontium 90 (^{90}Sr)	29 ans	32%
	Césium 137 (^{137}Cs)	30 ans	20%
	Tritium (^3H)	12 ans	3%
Exposition externe	Césium 137 (^{137}Cs)	30 ans	89%
Inhalation	Isotopes du plutonium (^{238}Pu , ^{239}Pu et ^{240}Pu) et américium 241 (^{241}Am)	88 ans, 24 000 ans, 6540 ans et 430 ans	41%
	Cérium 144 (^{144}Ce)	0,78 ans	27%
	Ruthénium 106 (^{106}Ru)	1 an	18%
	Strontium 90 (^{90}Sr)	29 ans	10%

Tableau 1 - Voies d'exposition des populations aux retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et principaux radionucléides contributeurs pour l'année 1975 d'après l'UNSCEAR [7].

3 ESTIMATION DES DOSES EFFICACES ANNUELLES ENGAGEES LIEES A L'INGESTION DE DENREES ALIMENTAIRES

3.1 Données utilisées et éléments méthodologiques

3.1.1 Données du SMCB

Pour estimer les doses efficaces annuelles liées à l'ingestion de denrées produites en Polynésie sur la période 1975-1981, l'IRSN s'est appuyé principalement sur des résultats de mesures acquises par le Service mixte de contrôle biologique (SMCB) [11,12, 13, 14, 15, 16].

Les rapports annuels du SMCB présentent les résultats des mesures effectuées dans des échantillons de denrées prélevées à Tureia, aux Gambier et sur quatre localités de Tahiti (Papeete, Hitiaa, Paea et Teahupoo), qui selon l'IRSN sont représentatives des principales denrées ou groupes de denrées produites et consommées sur ces îles et atolls. Ainsi, ces denrées ou types de denrées correspondent à ceux figurants dans les rations alimentaires utilisées dans cette étude et présentés dans le [tableau 2](#).

Les fréquences d'échantillonnage étaient le plus souvent mensuelles à trimestrielles et se sont espacées à la fin de la période étudiée. Deux types d'analyse étaient effectués sur ces échantillons :

- une analyse du strontium 90 dont les activités massiques étaient quantifiées quasiment systématiquement dans toutes les denrées au début de la période d'étude et moins fréquemment dans certaines d'entre-elles au début des années 80 en raison de la baisse des niveaux d'activités ;
- une analyse par spectrométrie gamma qui permettait notamment de mesurer le césium 137 dans quasiment toutes les denrées, ainsi que le cobalt 60 et ponctuellement le zinc 65 dans les mollusques marins (bénitiers et turbos) qui ont la particularité de concentrer ces deux éléments. Des radionucléides de période radioactive plus courte (zirconium 95, ruthénium 103, cérium 144 notamment) ont pu être décelés dans quelques denrées terrestres produites à Tahiti au cours des tous premiers mois de 1975 (retombées de l'essai CENTAURE de juillet 1974) ainsi que dans des denrées marines de Tureia et des Gambier jusqu'au milieu de la période d'étude (1977-1978).

Compte tenu d'une relative constance des activités massiques de césium 137 et de strontium 90 dans chaque denrée ou type de denrées sur la période 1975-1981 ([figure 2](#)), dont témoignent les rapports du SMCB, le nombre de résultats de mesures annuelles disponibles pour ces deux radionucléides est suffisant pour permettre une reconstitution satisfaisante des doses liées à leur incorporation par ingestion.

A noter : Pour le calcul des doses par ingestion, l'IRSN a retenu la moyenne arithmétique de la teneur en radionucléides dans les différents aliments, année par année. Lorsque l'activité massique en radionucléide dans un aliment était notée comme nulle (« 0 ») dans le rapport du SMCB, l'IRSN a retiré la mesure du calcul de la moyenne (car il postule qu'il ne pouvait être considéré comme totalement absent). Cette manière de procéder doit être regardée comme majorante.

3.1.2 Cas du tritium et du carbone 14

Les rapports du SMCB ne mentionnent aucun résultat d'analyse concernant le carbone 14 et le tritium. Or d'après l'UNSCEAR, ces deux radionucléides font partie des quatre plus importants contributeurs aux doses par ingestion à

l'échelle mondiale (tableau 1). L'activité de carbone 14 par kilogramme de carbone-élément (Bq/kg de carbone) et son évolution suite aux essais d'armes nucléaires, sont connus de manière précise depuis les années 1950 dans l'hémisphère Nord [17] où elles ont été très homogènes. En raison du comportement particulier du carbone dans l'environnement, cette activité massique élémentaire détermine l'activité volumique du carbone 14 dans l'air et son activité massique dans les denrées, et donc les doses par inhalation et ingestion correspondantes. Des chroniques établies en Allemagne, en Autriche, en Australie et en Nouvelle-Zélande, montrent que, depuis la fin des années 60, cette activité de carbone 14 par kilogramme de carbone dans l'hémisphère sud et son évolution, ont été quasiment identiques à celles observées dans l'hémisphère nord [18]. Les doses annuelles relatives à l'incorporation de ce radionucléide estimées pour l'ensemble de la population mondiale par l'UNSCEAR ou pour la métropole par l'IRSN, peuvent donc être considérées comme représentatives de celles reçues par les populations polynésiennes². D'après l'UNSCEAR, elles ont diminué de 3,5 µSv/an en 1975 à 2,5 µSv/an en 1981 [7]. Ces valeurs ont été retenues pour la présente étude.

Les doses annuelles liées à l'incorporation de tritium dans l'hémisphère nord sont beaucoup plus faibles que celles liées au carbone 14 ; elles ont diminué de 0,2 µSv/an en 1975 à 0,07 µSv/an en 1981 [7]. Les doses reçues par les populations polynésiennes n'ont pu être qu'inférieures à ces estimations pour deux raisons. D'une part, les activités de tritium dans l'air et donc dans les denrées terrestres ont été plus faibles dans l'hémisphère sud que dans l'hémisphère nord [19], et d'autre part les habitudes alimentaires polynésiennes sont caractérisées par une consommation assez importante de denrées marines dont les activités massiques en tritium sont toujours très inférieures à celles des denrées terrestres [20]. Compte tenu de ces observations et des valeurs très faibles estimées pour l'hémisphère nord, la contribution potentielle a été considérée comme négligeable dans cette étude.

3.1.3 Cas du plutonium

Les isotopes du plutonium ne sont habituellement pas considérés parmi les principaux contributeurs à la dose liée à l'ingestion de denrées (tableau 1) marquées par les retombées des essais nucléaires. Par ailleurs, les rapports du SMCB ne fournissent pas de résultat d'analyse de ces radionucléides dans les denrées. Toutefois, afin de ne négliger, a priori, aucune composante à la dose par ingestion, une approche calculatoire simple a été menée dans la présente étude pour estimer l'ordre de grandeur de leur contribution potentielle.

L'activité volumique du plutonium 239+240 dans les eaux marines de l'hémisphère sud a fait l'objet de plusieurs campagnes de mesure dans les années 70 à 90 [21, 22]. Les résultats de ces campagnes s'accordent sur des activités volumiques des eaux de surface de l'ordre de 10 mBq/L pouvant atteindre un maximum de 80 mBq/L autour de 300 m de profondeur. Une activité de 100 mBq/L a été retenue pour cette étude. A partir de cette activité en plutonium des eaux et sur la base des facteurs de concentration préconisés par l'AIEA [23], des ordres de grandeurs des activités massiques dans les poissons, crustacés et mollusques ont pu être calculées³. De la même manière, les activités massiques du plutonium dans les denrées terrestres peuvent être déduites de celles des sols. Le plutonium est peu transféré depuis le sol vers les denrées végétales et ne l'est quasiment pas vers le lait et la viande ; les valeurs du facteur de transfert sol-denrées reportées dans la littérature sont le plus souvent inférieures à 10⁻⁴ Bq/kg par Bq/kg de sol. Une valeur 10 fois

² La quantité totale de carbone ingérée quotidiennement est assez peu sensible à la ration alimentaire ; les habitudes alimentaires particulières modifient peu la quantité de carbone quotidiennement ingérée et donc l'incorporation de ¹⁴C.

³ Il faut noter que l'application de ces facteurs de concentration à l'activité volumique actuelle du plutonium dans l'eau permet d'estimer par calcul, des activités massiques dans les poissons tout à fait concordantes avec celles mesurées par l'IRSN en Polynésie française de 2001 à 2016.

supérieure a été retenue (10^{-3} Bq/kg de denrée fraîche par Bq/kg de sol) et appliquée⁴ à une activité massique du plutonium dans les sols au cours de la période d'étude estimée à 1 Bq/kg⁵ [4]. De plus, afin de ne négliger aucune voie de transfert, le dépôt atmosphérique du plutonium sur les légumes-feuilles, basé sur des mesures de l'activité volumique du plutonium dans l'air (voir chapitre 4), a également été considéré dans les calculs.

3.1.4 Cas de l'eau de boisson

Aucun résultat d'analyse d'eau douce destinée à la boisson ne figure dans les rapports du SMCB durant la période 1975-1981 ; seule l'eau de coco était analysée. Sur les îles et atolls, l'eau de boisson produite localement peut être soit de l'eau de pluie, soit de l'eau de source. Compte tenu, d'une part des activités volumiques des radionucléides encore présents dans l'air au cours de la période d'étude, à l'origine de la contamination des eaux de pluie, et d'autre part des très faibles activités massiques présentes dans les sols et susceptibles d'être transférées aux eaux souterraines, il a été considéré dans le présent travail que la consommation d'eau de pluie comme eau de boisson était plus pénalisante pour les estimations de dose. C'est donc cette origine qui a été retenue pour l'eau de boisson. Les activités volumiques du césium 137, du strontium 90 et des isotopes du plutonium dans les eaux de pluie ont ainsi été estimées à partir des activités mesurées dans l'air par l'IRSN en utilisant un rapport entre l'activité volumique dans l'air et celle dans l'eau de pluie de 1 000 Bq/L d'eau de pluie pour une activité volumique de l'air de 1 Bq/m³⁶.

3.1.5 Rations alimentaires et facteurs de dose par unité d'incorporation

Sur la base des activités volumiques et massiques des denrées alimentaires liquides et solides, les activités de chaque radionucléide annuellement incorporées par des adultes ont été estimées par la prise en compte de rations alimentaires. A partir des activités annuellement incorporées calculées, les doses efficaces liées à l'ingestion de denrées sont estimées au moyen des facteurs de dose par unité d'incorporation (DPUI) mentionnés pour les adultes dans l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 [24].

3.1.5.1 *Rations alimentaires des adultes*

Pour estimer les doses par ingestion reçues par les populations de Tahiti-Papeete, de Tureia et des Gambier, entre 1975 et 1978, le SMCB a utilisé des rations alimentaires dans lesquelles les produits locaux représentaient entre 63% (pour Papeete) et 87% (pour les Gambier) des quantités totales annuellement ingérées [12,13,14]. Les quantités totales de denrées locales consommées étaient ainsi de 400 kg/an pour Papeete et Tureia, et 520 kg/an pour les Gambier. Seuls du riz, des farines, du sucre et du bœuf en conserve étaient supposés importés aux Gambier, avec une consommation totale de denrées importées de seulement 77 kg/an ; dans le cas de Papeete, des légumes et une faible quantité de fruits

⁴ Il faut noter que l'application de ce facteur de transfert de 10^{-3} kg de sol par kg de végétal frais, à l'activité massique moyenne du plutonium 239+240 mesurée dans les sols polynésiens ces dernières années, allant de 0,035 Bq/kg à Hao à 0,84 Bq/kg aux Gambier, permet d'estimer des activités massiques dans le coprah concordante avec celles mesurées par l'IRSN sur différentes îles et atolls de Polynésie française [4].

⁵ Les profils de contamination des sols en plutonium réalisés à partir de prélèvements effectués dans différents îles et atolls de Polynésie française montrent une faible migration de ce radioélément vers la profondeur [28].

⁶ Ce rapport entre l'activité volumique de l'eau de pluie et celle de l'air, exprimé en Bq/L d'eau par Bq/m³ d'air (m³/L) a été estimé pour quatre radionucléides (⁹⁰Sr, ⁹⁸⁵Zr, ¹³⁷Cs et ¹⁰⁶Ru) sur la base de centaines de résultats de mesure acquis durant les retombées des essais nucléaires sur la métropole [8]. Les valeurs moyennes étaient comprises entre 350 ± 140 m³/L pour le zirconium 95 et 600 ± 210 m³/L pour le strontium 90 pour une moyenne de 500 ± 200 m³/L. Une quinzaine de valeurs de ce rapport a pu être calculée à partir d'analyses néo-zélandaises de strontium 90 dans les eaux de pluie sur les îles Tonga et Fidji situées à la même latitude que la Polynésie française et des analyses de ce radionucléide dans l'air faites par l'IRSN (voir chapitre sur les doses par inhalation) ; la moyenne calculée de ce rapport est la même que celle calculée pour la métropole : 600 m³/L. Pour estimer l'activité des eaux de pluie utilisées comme eau de boisson, une valeur supérieure de 1000 m³/L a été retenue pour cette étude.

venaient compléter le régime alimentaire avec une quantité totale de denrées importées consommée plus importante de 232 kg/an.

Au milieu des années 2000, le Ministère de la Défense a réutilisé ces mêmes quantités de denrées locales consommées établies par le SMCB pour estimer les doses par ingestion susceptibles d'avoir été reçues lors des retombées de certains essais nucléaires entre 1966 et 1974. Pour distinguer les populations rurales de Tahiti (Hitiaa, Teahupoo et Paea) de celle de Papeete dans son étude, et en absence de ration spécifiques définie pour ces communes rurales, le Ministère de la Défense a repris la ration établie pour Tureia par le SMCB au cours des années 1975-1978.

De 1982 à 2016, l'IRSN a utilisé pour évaluer les doses par ingestion, les rations alimentaires contenues dans le rapport conjoint CEA-IPSN traitant de la Situation radiologique en Polynésie française et de son évolution depuis 1975 [6]. Dans ces rations alimentaires, les quantités consommées de produits locaux sont plus faibles que dans les rations utilisées par le SMCB et le Ministère de la Défense présentées précédemment, avec par exemple, une masse de denrées solides d'origine locale annuellement consommées de l'ordre de 200 kg/an pour un adulte de Papeete. Cela signifie qu'une part importante des denrées consommées était supposée être importée (de l'ordre de 50% ou plus). Cette part de denrées importées a été progressivement estimée et prise en compte dans les calculs de dose effectués par l'IRSN. Ainsi, les doses par ingestion calculées par l'IRSN au milieu des années 1980 ne résultent plus seulement des retombées globales des essais nucléaires en Polynésie, mais des principaux radionucléides artificiels présents dans les denrées consommées quelle que soit leur origine. Ainsi, les graphiques du chapitre 6.2 qui présentent l'évolution des doses estimées entre 1975 et 2016 font apparaître une estimation nettement plus élevée en 1987 qui est imputable à la contamination par les retombées de l'accident de Tchernobyl des denrées importées en Polynésie cette année-là.

Pour évaluer dans la présente étude les doses efficaces potentiellement reçues par les populations de Polynésie française sur la période 1975-1981, l'IRSN a décidé de se baser sur les deux rations alimentaires présentées précédemment : celle de 1975 (utilisée par le SMCB et le Ministère de la Défense) et celle de 1982 (utilisée par l'IPSN puis l'IRSN depuis 1982), en ne considérant que les denrées produites localement (les denrées importées, prises en compte dans les estimations dosimétriques de l'IPSN à partir de 1982, ne le sont pas dans cette étude).

La ration de 1975, reprise au milieu des années 2000 par le Ministère de la Défense, a été adaptée pour cette étude en ce qui concerne les communes rurales de Tahiti (Hitiaa, Teahupoo et Paea). En effet, la ration utilisée par le Ministère de la Défense pour ces communes rurales, reprenant la ration de Tureia, ne mentionne aucune consommation de fruits et de légumes-racines locaux [2]. L'IRSN estime qu'il est peu probable qu'aucun fruit ou légume-racine ne soit consommé sur ces communes alors que c'est le cas à Papeete ; aussi, les quantités de ces denrées consommées sur Papeete ont été ajoutées à la ration alimentaire de Hitiaa, Teahupoo et Paea. Enfin, les quantités correspondant aux consommations d'eau de boisson et d'eau de coco sur Tureia et les Gambier ont alternées entre 365 L/an et 730 L/an suivant les rapports. L'IRSN a fixé ces valeurs à 730 L/an pour l'eau de boisson et 365 L/an pour l'eau de coco pour les rendre cohérentes avec les quantités retenues à partir 1982. Les rations alimentaires ainsi établies sont présentées dans le tableau 2.

	Tureia		Gambier		Papeete		Tahiti rural	
	1975	1982	1975	1982	1975	1982	1975	1982
eau de boisson	730	730	730	730	986	730	730	730
eau de coco	365	365	365	365	2	8,4	365	18
Lait					110	16	110	18
Total denrées liquides	1095	1095	1095	1095	1098	754	1205	766
bœuf				15	10	2,2	3,7	2,2
chien	3,7	3,7						
porc	3,7	3,7	15	15	18	11	3,7	11
poulet	3,7	3,7	15	15	0,4	3,7	3,7	3,7
poisson de lagon et de récif	161	161	110	110	84	33	161	31
poisson de surface		5,5		15	39	16	11	11
poisson de profondeur	11	5,5	29	15	5	0,4		3,7
ature (Chinchard)					7	7,3		1,8
bénitier	37	37	11	15	5	3,3	37	1,1
turbo	22	22	11	7,3	5	1,1	22	3,7
langouste	7		15		0,4	1,1	7	0,7
poulpe	11	11						
chevrette					0,4	1,1		1,8
légumes fruits	22	22	73	66	88	19	88	19
légumes feuilles			26	15	23	23	23	20
légumes racines			88	73	42	21	42	22
coprah	80	80	55	55	2	15	80	18
fruits	40	22	73	60	71	41	62	48
Total denrées solides	402	377	521	476	400	199	544	199
Total denrées solides et liquides	1497	1472	1616	1571	1498	953	1749	965

Tableau 2 - Rations alimentaires (kg ou L par an) en 1975 et en 1982 pour les six localités⁷. L'écart observé dans les quantités de denrées solides annuellement consommées entre les rations de 1975 et 1982 s'explique par le fait que la ration de 1982 fait une large part aux denrées importées. Pour cette étude, seules les consommations de denrées locales sont considérées dans l'objectif d'évaluer des doses dues aux retombées des essais nucléaires sur la Polynésie.

3.1.5.2 Rations alimentaires des enfants

Les doses par ingestion reçues par les enfants sont différentes de celles reçues par les adultes du fait de rations alimentaires différentes et de facteurs de dose par unité d'activité incorporée (Sv/Bq incorporé) qui évoluent avec l'âge [25].

Les études sur les habitudes alimentaires des enfants sont rares. Afin de permettre l'utilisation de leurs résultats dans différents régions ou contextes, les quantités consommées sont souvent reliées à celles des adultes en considérant que les enfants consomment une fraction de la quantité consommée par les adultes, spécifique à chaque type de denrée et qui évolue avec l'âge. Ainsi, des rapports entre les quantités consommées par les enfants et par les adultes en fonction de

⁷ Les légumes-feuilles et les légumes-racines n'ont pas été prélevés et analysés à Tureia du fait qu'ils n'y étaient peu ou pas produits ; ils ne figuraient pas non plus dans la ration alimentaire de cet atoll. De même, ce n'est que sur Tahiti qu'étaient produits de la viande de bœuf et du lait de vache. En revanche, la viande de chien consommée sur Tureia était échantillonnée pour analyse.

l'âge des enfants (ratios enfants/adultes), ont été déduits des trois enquêtes Individuelles Nationales des Consommations Alimentaires (INCA) successivement menées par l'Agence nationale de sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) en 1998-1999 (INCA1), 2006-2007 (INCA2) et 2014-2015 (INCA3) [https://www.anses.fr/fr/content/], dont les résultats sont convergents [31]. Les ratios enfants/adultes issus de l'enquête INCA3 et utilisés dans une récente étude du CEA [32], ont été agrégés⁸ pour cette étude selon les mêmes classes d'âges que celles pour lesquelles sont fournis les facteurs de dose par unité d'incorporations [25] ; ils sont présentés dans le tableau 3.

L'enquête alimentaire réalisée par le CEA/IPSN à Tahiti entre 1980 et 1982 [34], fournit des quantités quotidiennement consommées de certaines denrées⁹ pour trois classes d'âges. Elle ne fournit pas d'élément sur la consommation de lait (et de produits laitiers), ni d'eau de boisson et ne traite pas des enfants de moins de 2 ans. Par ailleurs, elle ne fournit que très peu d'indication et aucun élément de quantification sur l'origine des denrées consommées (locales ou importée). Surtout, elle ne porte que sur Tahiti (et pas sur Tureia et les Gambier), avec une différenciation des rations par ethnies (tahitiens, européens et asiatiques) et par catégories socio-professionnelles, alors que pour les adultes, les rations alimentaires distinguent deux modes de vie : urbain et rural (voir le § 3.1.5.1).

Il est intéressant de déduire de cette enquête alimentaire tahitienne des ratios de quantités consommées enfants/adultes, comparables à ceux issus de l'enquête INCA3 ; ces ratios¹⁰ sont également présentés dans le tableau 3.

Enfin, à titre indicatif, les valeurs de ces ratios proposées par l'AIEA¹¹ [33] sont aussi fournies dans le tableau 3. Aucune valeur n'est proposée par l'AIEA pour les eaux de boisson, ni pour les poissons ; pour les viandes une valeur unique est proposée.

Classe d'âges Denrées / Sources	1-2 ans		2-7 ans			7-12 ans			12-17 ans	
	INCA	AIEA	INCA	CEA	AIEA	INCA	CEA	AIEA	INCA	CEA
Laits	1,25	1,3	1,39		0,56	1,87		0,73	1,76	
viande bœuf	0,43	0,22	0,56	0,68	0,4	0,78	0,82	0,63	0,67	0,92
poulet	0,33	0,22	0,56	0,49	0,4	0,92	0,75	0,63	1,20	0,89
Porc	0,52	0,22	0,67	0,53	0,4	0,76	0,75	0,63	0,75	0,91
poisson	0,37		0,55	0,48		0,65	0,68		0,65	0,86
Légumes (feuilles et fruits)	0,33	0,49	0,43	0,61	0,61	0,56	0,77	0,76	0,52	0,87
Légumes racines	0,49	0,29	0,70	0,48	0,45	0,79	0,68	0,66	0,62	0,88
fruits	0,73	0,33	0,84	0,49	0,49	0,77	0,73	0,69	0,62	0,93
eaux	0,30		0,42			0,50			0,57	

Tableau 3 - Ratios de quantités consommées enfants/adultes pour différentes classes d'âges, déduits de l'enquête INCA3 (d'après [31]), proposés par l'AIEA [33] et issus de l'enquête alimentaire effectuée sur Tahiti par le CEA/IPSN entre 1980 et 1982 [34].

⁸ Les classes d'âge déterminées pour les différentes enquêtes alimentaires sont toujours différentes, y compris entre les enquêtes INCA. Pour INCA3 les classes d'âges sont : 0-1 an, 1-3 ans, 4-6 ans, 7-10 ans, 11-14 ans et 14-17 ans. Les classes d'âges pour lesquelles sont fournis les facteurs de doses étant 1-2 ans, 2-7 ans, 7-12 ans et 12-17 ans, les ratios enfants/adultes issus de cette enquête alimentaire ont été agrégés selon ces classes d'âges par des moyennes interclasses.

⁹ Les denrées concernées par l'enquête du CEA sur Tahiti sont : les viandes de porc, de bœuf, de poulet et la charcuterie, le coprah, deux fruits d'arbres (l'uru et les bananes), trois légumes-feuilles (la salade, le fafa et le chou pomme), deux légumes racines (le taro et la patate douce) et trois légumes fruits (la tomate, le petit-pois et le concombre). Le lait et les eaux de boissons ne sont pas fournis pour les enfants.

¹⁰ L'enquête alimentaire effectuée en 1980-1982 sur Tahiti distinguait les enfants de 2-4 ans, 4-8 ans, 8-13 ans et 13-20 ans. Les classes d'âges pour lesquelles sont fournis les facteurs de doses étant 1-2 ans, 2-7 ans, 7-12 ans et 12-17 ans, les ratios enfants/adultes issus de cette enquête alimentaire ont été agrégés selon ces classes d'âges par des moyennes interclasses.

¹¹ L'AIEA fournit des données pour des enfants de 1-2 ans, 5 ans et 10 ans.

Les ratios de quantités consommées enfants/adultes des enquêtes INCA3 et CEA sont assez proches, notamment pour les enfants de 7 à 12 ans. Pour les enfants de 2 à 7 ans, les ratios issus de l'enquête INCA3 sont plus élevés que ceux issus de l'enquête du CEA (jusqu'à +70% pour les fruits). C'est l'inverse pour les adolescents (12-17 ans) dont les ratios de l'enquête du CEA sont jusqu'à +34% supérieurs dans le cas des fruits. Les ratios proposés par l'AIEA sont systématiquement inférieurs, notamment dans le cas des consommations de lait (pour l'AIEA les enfants consommeraient moins de lait et produits laitiers que les adultes).

Pour cette étude, l'IRSN choisit d'utiliser les ratios issus de l'enquête INCA3 qui couvre toutes les classes d'âges et tous les types de denrées, et qui sont globalement très proches de ceux issus de l'enquête du CEA sur Tahiti, tout en restant le plus souvent plus élevés et donc plus pénalisants vis-à-vis des doses par ingestion (le cas des adolescents étant « couverts » par les estimations des doses aux adultes). Ces ratios sont appliqués aux deux rations alimentaires retenues pour les adultes (tableau 2) de manière à obtenir les quantités de chaque type de denrées consommées par les enfants.

Les doses pour les enfants de moins de 1 an, notamment les nourrissons jusqu'à 4-5 mois, nourris essentiellement de lait maternel ou de lait maternisé (à raison de l'ordre de 0,8 L/j), ne sont pas estimées dans cette étude.

3.2 Activités massiques et volumiques des denrées alimentaires produites sur les six localités retenues pour cette étude

La [figure 2](#) permet d'illustrer les résultats des mesures du SMCB exploités dans cette étude ; elle montre notamment le nombre et la fréquence des analyses (le plus souvent trimestrielle), la variabilité des activités massiques ou volumiques mesurées au sein d'une même localité, les différences de niveaux d'activités entre les localités, ainsi que les valeurs des limites de détection¹² qui apparaissent par les alignements de valeurs basses ; les valeurs indiquées comme égales à « 0 » dans les rapports ne sont pas représentées.

Les [figures 3, 4 et 5](#) présentent les moyennes annuelles des activités massiques du césium 137, du strontium 90 et du cobalt 60 mesurées dans les denrées alimentaires. La lecture de ces graphiques amène plusieurs commentaires.

- Les activités massiques moyennes annuelles du césium 137 dans les denrées végétales sont comprises entre 0,05 et 20 Bq/kg frais ; celles des viandes de bœuf, de porc et de chien sont plus élevées, comprises entre 4 et 60 Bq/kg frais. Ces activités, relativement élevées au regard de celles des sols, s'expliquent principalement par le fait que dans des sols extrêmement pauvres en potassium comme la plupart des sols polynésiens, l'absorption racinaire du césium, analogue chimique du potassium, est très importante¹³.
- Une carence en potassium encore plus forte dans les sols des atolls et un transfert racinaire d'autant plus important, expliquent que les activités des denrées terrestres prélevées à Tureia sont supérieures d'un ordre de grandeur à celles prélevées à Tahiti ou aux Gambier alors que les activités massiques des sols de cet atoll n'y sont pas plus

¹² Lorsque l'activité du radionucléide dans l'échantillon analysé est trop faible pour que l'on puisse la quantifier, le métrologiste indique l'activité minimale que devrait avoir l'échantillon pour que l'on puisse la mesurer ; l'activité réelle dans l'échantillon peut être considérée comme inférieure à cette valeur.

¹³ Ce mécanisme est bien documenté dans la bibliographie [26]. A titre d'exemple, l'activité volumique du césium 137 dans le lait produit à Tahiti illustre particulièrement bien le transfert important de ce radionucléide du sol vers les herbages et le lait. Les activités de césium 137 dans le lait de Tahiti, comprises entre 4 et 8 Bq/L sur la période 1975-1981, sont du même ordre, voire supérieures, à celles mesurées dans du lait récolté quelques mois seulement après l'accident de Tchernobyl sur les zones de France métropolitaines les plus touchées par cet accident.

élevées. Ainsi, les activités moyennes annuelles du césium 137 dans les légumes fruits, le coprah et les autres fruits d'arbres produits à Tureia, sont comprises entre 4 et 30 Bq/kg frais.

- A Tahiti, les denrées produites à Hitiaa présentent les activités moyennes de césium 137 les plus élevées, celles produites sur Paea les plus basses. Cet écart qui atteint parfois un ordre de grandeur est lié d'une part aux activités dans les sols (les retombées de l'ensemble des essais nucléaires ont globalement été plus importantes sur le Nord-Est de l'île où les précipitations sont plus importantes (figure 1), et d'autre part à la nature des sols qui engendre, comme expliqué précédemment, un transfert plus ou moins important des radionucléides du sol vers les plantes.
- En revanche, les activités du césium 137 dans les denrées marines, comprises le plus souvent entre 0,1 et 1 Bq/kg frais sont très homogènes d'une localité à l'autre, ce qui témoigne du brassage et de l'homogénéisation des radionucléides au sein des masses d'eau.
- Les activités massiques moyennes annuelles du strontium 90 dans les denrées végétales sont de un à deux ordres de grandeurs inférieures à celles du césium 137. Ceci s'explique d'une part par un transfert racinaire du césium plus élevé que celui du strontium (pour la raison évoquée précédemment et contrairement à ce qui est observé dans des sols de climat tempéré comme ceux de la métropole) et d'autre part par le fait que le strontium 90 est moins retenu dans les sols et est plus rapidement entraîné vers la profondeur par les eaux pluviales où il devient inaccessible aux racines des végétaux. Cette migration plus rapide du strontium vers la profondeur du sol, observable dans presque tous les types de sol autour de la planète, est renforcée en Polynésie par les importantes hauteurs de précipitations annuelles.
- Les activités massiques du strontium 90 dans les viandes sont aussi de l'ordre de 100 fois plus faibles celles du césium 137, le plus souvent comprises entre 0,01 et 0,1 Bq/kg frais (au lieu de 4 à 60 Bq/kg frais pour le césium 137). Deux raisons expliquent ce constat : d'une part les plus faibles activités massiques du strontium dans les aliments donnés aux animaux, et d'autre part un transfert du strontium aux muscles des animaux et donc à la viande, beaucoup plus faible que celui du césium [26].
- Bien que moins abondant dans les retombées atmosphériques des essais nucléaires que le césium 137 et le strontium 90, et de période radioactive plus courte que celles de ces deux radionucléides, le cobalt 60 a pu être décelé dans la plupart des produits marins entre 1975 et 1981 et plus particulièrement dans des mollusques comme le bénitier ou le turbo (figure 5). Durant cette période les concentrations les plus élevées ont été observées pour les échantillons des îles les plus proches de Moruroa, jusqu'à 24 Bq/kg frais aux Gambier (3,7 Bq/kg frais à Tureia) en août 1976 et 5,9 Bq/kg frais en novembre 1979 à Tureia. Pour les quatre localités de Tahiti les concentrations étaient généralement inférieures à 1 Bq/kg frais avec une valeur maximale à 3,7 Bq/kg frais dans un prélèvement effectué à Hitiaa en novembre 1975.

D'autres radionucléides de périodes plus courtes (^{65}Zn , ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{141}Ce , ^{144}Ce), ont parfois été mesurés, principalement dans les mollusques marins jusqu'en 1979. Les concentrations les plus élevées ont été relevées en début d'année 1975 dans la chair de turbo: 126 Bq/kg frais en ^{95}Zr à Tureia au mois de février (27 Bq/kg frais aux Gambier en janvier), 59 Bq/kg frais en ^{144}Ce à Tureia et 3,4 Bq/kg frais aux Gambier en mai, 17 Bq/kg frais en ^{141}Ce à Tureia en février.

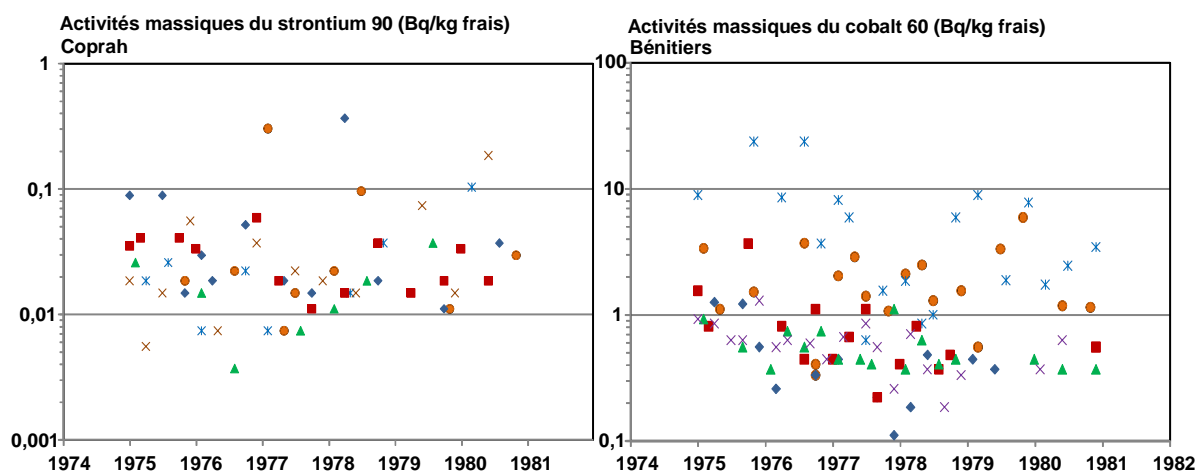
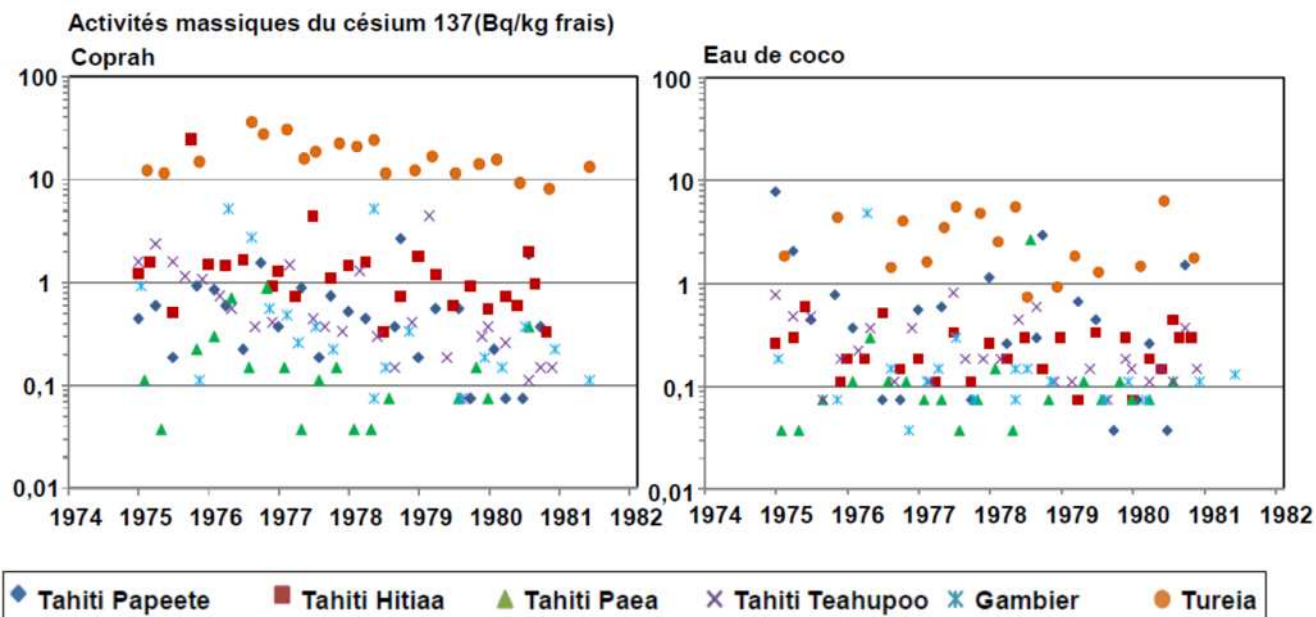


Figure 2 - Activités massiques du césium 137 mesurées dans les noix de coco (coprah et eau de coco), du strontium 90 dans le coprah et du cobalt 60 dans la chair de bénéitier (Bq/kg frais).

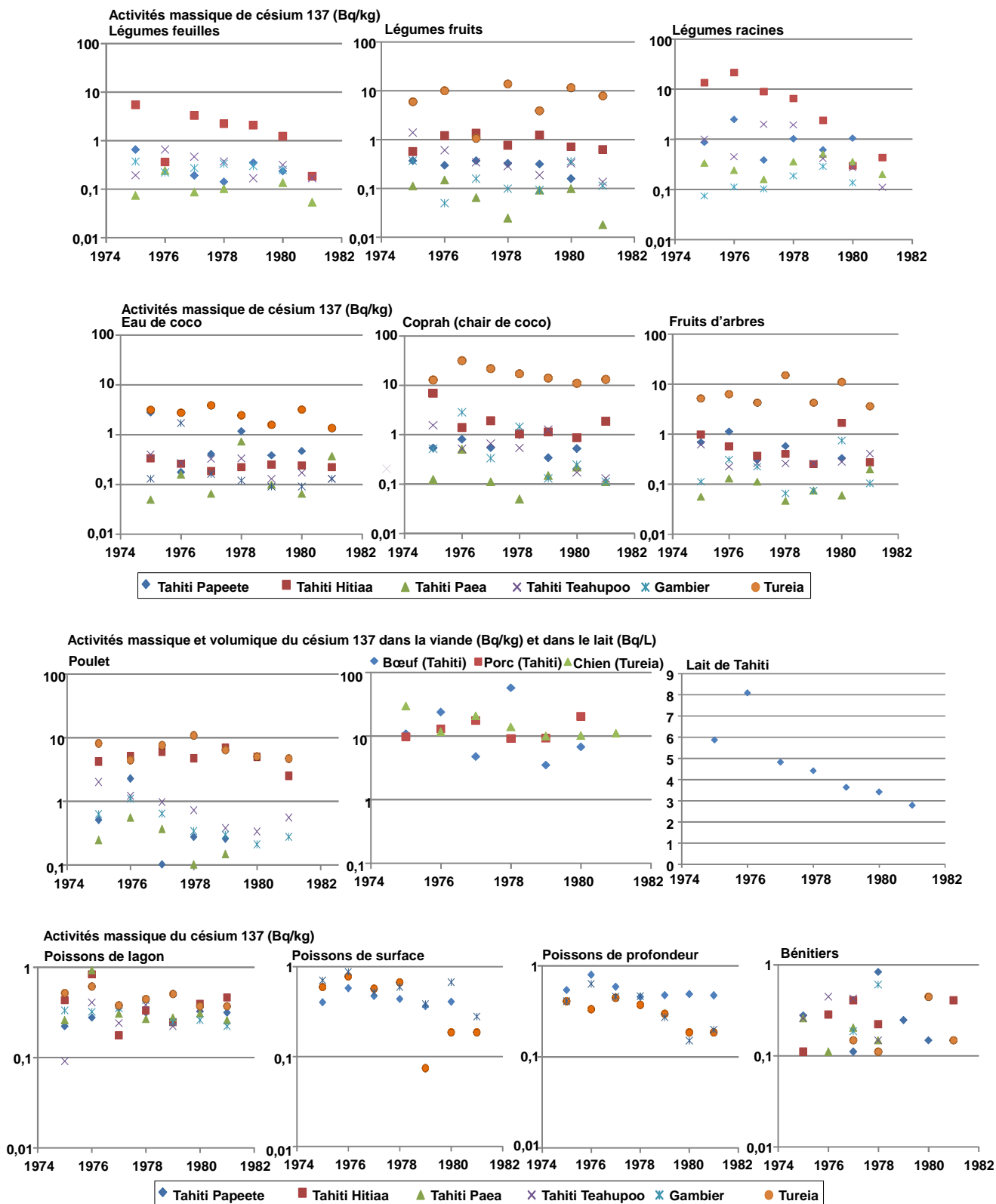


Figure 3 - Moyennes annuelles des activités massiques du césium 137 mesurées par le SMCB dans les denrées produites sur les six localités de Polynésie française sélectionnées pour cette étude (Bq/kg frais).

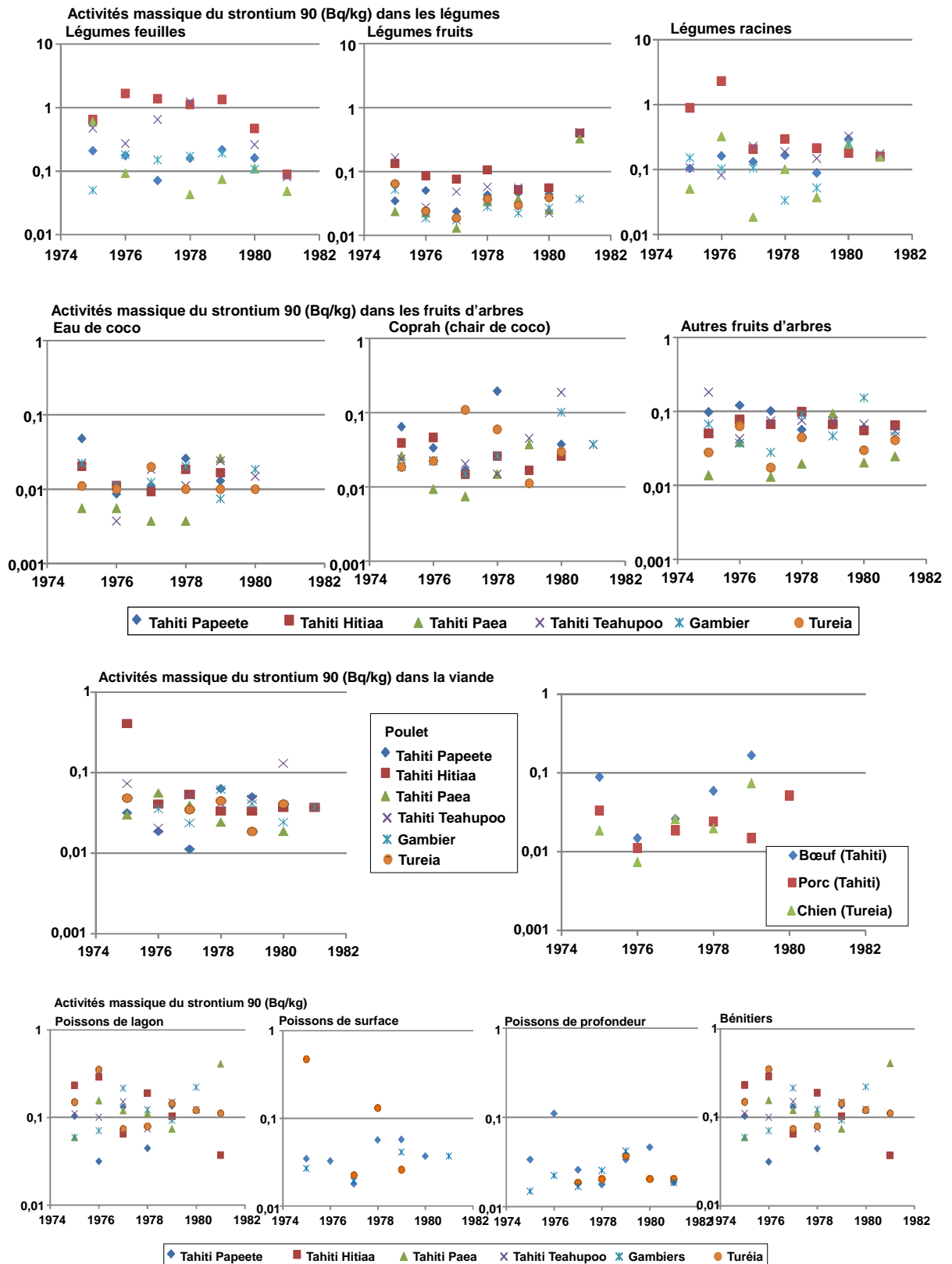


Figure 4 - Moyennes annuelles des activités massiques du strontium 90 mesurées par le SMCB dans les denrées produites sur les six localités de Polynésie française sélectionnées pour cette étude (Bq/kg frais).

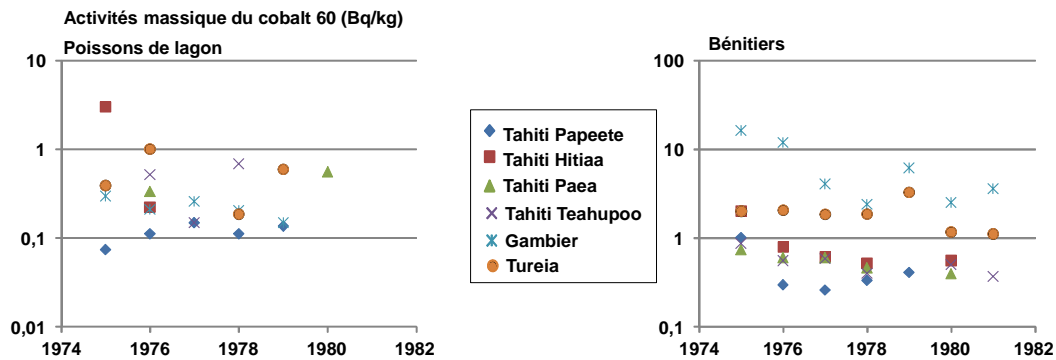


Figure 5 - Moyennes annuelles des activités massiques du cobalt 60 mesurées par le SMCB dans des poissons de lagon et dans la chair de bénéitier sur les six localités de Polynésie française sélectionnées pour cette étude (Bq/kg frais).

3.3 Doses efficaces liées à l'ingestion de denrées par des adultes et des enfants âgés de plus d'un an résidant en Polynésie Française entre 1975 et 1981

La figure 6 présente les doses efficaces annuellement engagées par ingestion de denrées, pour un adulte résidant en Polynésie française entre 1975 et 1981 ; le graphique de gauche présente les doses estimées en utilisant la ration alimentaire de 1975, le graphique de droite celles estimées en utilisant la ration alimentaire de 1982.

La figure 7 et la Figure 8 présentent les doses efficaces annuellement engagées dans chacune des six localités pour les enfants de quatre classes d'âges ainsi que pour les adultes entre 1975 et 1981.

La variabilité des estimations dosimétriques est le reflet, d'une part des activités massiques et volumiques des denrées alimentaires commentées précédemment et d'autre part des rations alimentaires utilisées (figure 9).

Toutes localités et toutes classes d'âges confondues, les doses estimées pour Tureia sont les plus élevées et les deux rations alimentaires conduisent pour cette population à des estimations annuelles très proches ; elles sont comprises entre 65 μ Sv/an en 1976 avec la ration de 1975 et 29 μ Sv/an en 1981 avec la ration de 1982.

Pour toutes les localités et toutes les classes d'âges, on peut noter une diminution des doses entre 1975-76 et 1981, qui peut atteindre de l'ordre d'un facteur 2 et qui est liée à la diminution de la contamination des denrées.

3.3.1 Comparaison des doses par ingestion suivant l'âge

Les doses reçues par les enfants à Tureia sont inférieures à celles reçues par les adultes (de 20% à 45%) ; cette différence s'explique principalement par la ration alimentaire respective des enfants et des adultes à Tureia. En revanche, les doses reçues sont moins différenciées entre classes d'âge sur les cinq autres sites. On relève cependant quelques valeurs plus élevées pour les enfants. C'est le cas des quatre sites de Tahiti où les doses des enfants de la classe d'âge 12-17 ans notamment, sont en moyenne, sur la période 1975-1981, entre 5% (Hitiaa) et 38% (Paea) plus élevées que celles des adultes en liaison avec la consommation de lait produit localement (il n'y a pas de consommation de lait local à Tureia et aux Gambier) dont la concentration en césium 137 est de quelques Bq/L. C'est le cas aussi aux Gambier où les doses de la classe d'âge 1-2 ans sont en moyenne sur la même période environ 5% plus élevées que celles des adultes due à la présence dans les bénéitiers de cobalt 60 dont la DPUI est 10 fois plus élevée pour les enfants de 1-2 ans que pour les adultes même si les quantités de bénéitier consommées par les enfants sont 2 fois plus faibles que celles des adultes.

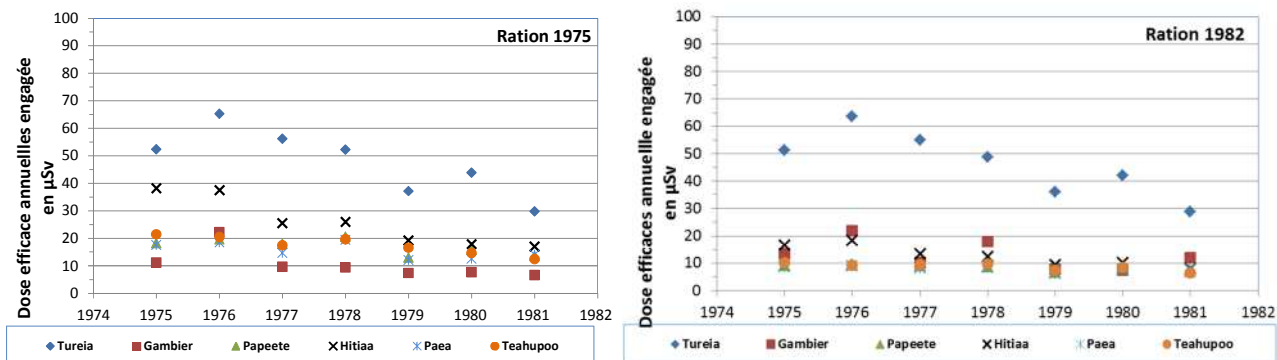


Figure 6 - Doses efficaces annuelles engagées, en μSv , dues à l'ingestion de denrées locales pour les adultes vivant dans les six sites étudiés entre 1975 et 1981, calculées avec les rations alimentaires de 1975 et de 1982.

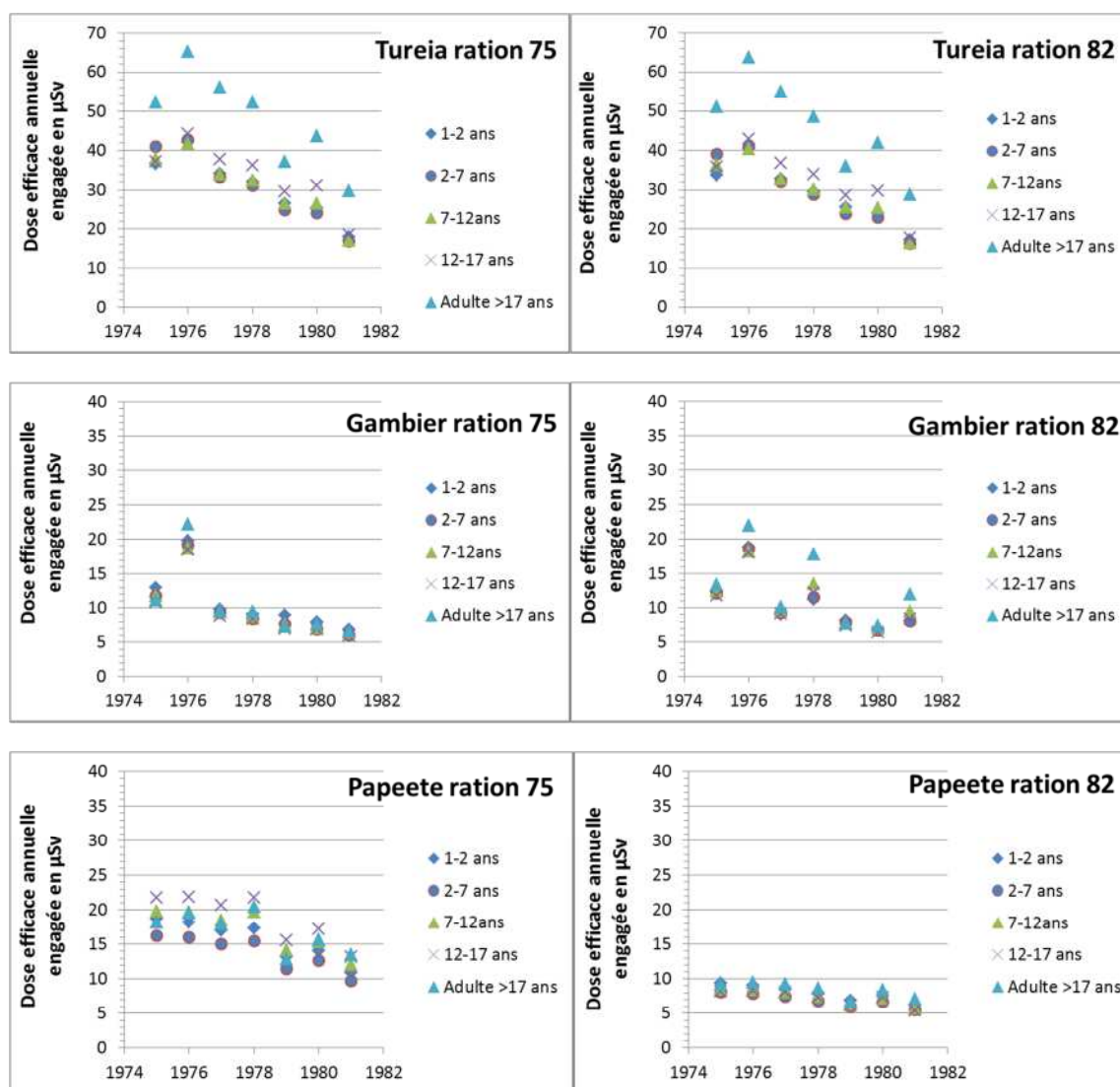


Figure 7 - Doses efficaces annuelles engagées, en μSv , dues à l'ingestion de denrées locales pour les adultes et les enfants vivant à Tureia, aux Gambier ou à Papeete entre 1975 et 1981, calculées avec les rations alimentaires de 1975 et de 1982.

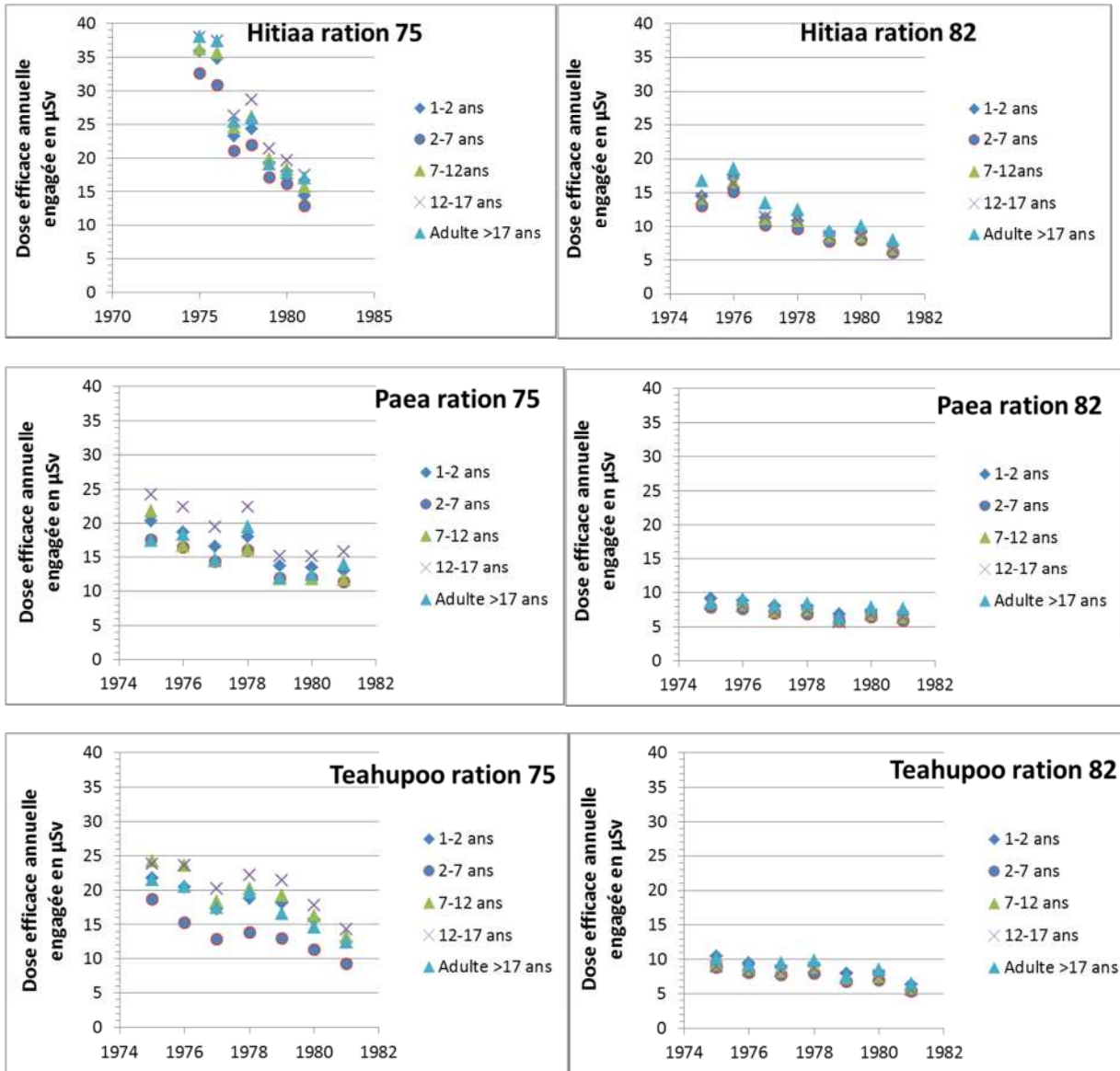


Figure 8 - Doses efficaces annuelles engagées, en μSv , dues à l'ingestion de denrées locales pour les adultes et les enfants vivant à Hitiaa, à Paea ou à Teahupoo entre 1975 et 1981, calculées avec les rations alimentaires de 1975 et de 1982.

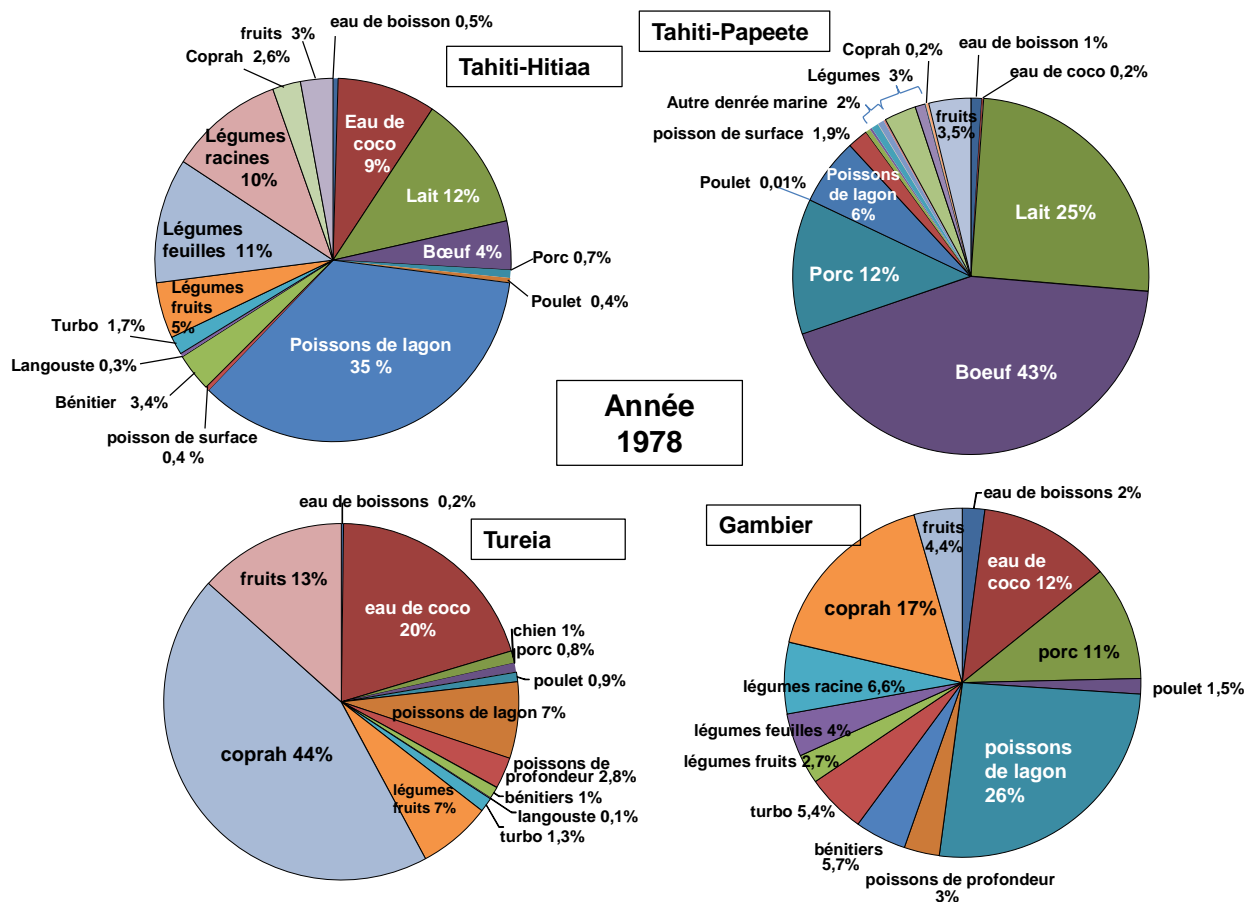


Figure 9 - Contributions des différentes denrées (ration 1975) ou catégories de denrées aux doses efficaces par ingestion potentiellement reçues par des adultes ayant résidé en Polynésie française en 1978.

3.3.2 Comparaison des doses estimées pour les adultes suivant la ration alimentaire utilisée

A Tureia, la ration alimentaire de 1975 étant très proche de celle de 1982, les résultats dosimétriques varient peu entre les deux types de rations (2 à 7% plus élevés avec la ration de 1975 qu'avec celle de 1982). Pour les Gambiers, les niveaux de dose calculés avec les deux types de rations alimentaires sont assez proches même si, ponctuellement, certains écarts sont observables. Ces écarts proviennent principalement de différences dans la consommation de viande de bœuf entre les deux régimes (importante avec la ration de 1982 et nulle dans la ration de 1975).

Pour les localités de Tahiti, les doses par ingestion estimées avec la ration de 1975 sont environ deux fois plus élevées (de 59% à 140% sur la période 1975-1981) qu'elles le sont en les calculant avec la ration de 1982. Cet écart résulte de différences dans les quantités consommées de certaines denrées.

3.3.3 Comparaison des doses estimées pour les adultes suivant les différentes localités

Les doses potentiellement reçues par les résidents de Tureia, comprises pour les adultes entre 30 et 66 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, entre 17 et 45 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour les enfants des 4 classes d'âge, quelle que soit la ration utilisée, se distinguent nettement de celles reçues dans les cinq autres localités, comprises entre 6 et 38 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour les adultes comme pour les enfants avec la ration de 1975 comme avec la ration de 1982.

L'écart dosimétrique entre Tahiti-Hitiaa et les trois autres localités de Tahiti (Papeete, Paea et Teahupoo) s'explique principalement par des activités de césium 137 dans les denrées terrestres presque systématiquement supérieures (Cf. chapitre 3.2) ; les retombées atmosphériques ont été plus importantes sur la côte est de Tahiti que sur le reste de l'île en raison d'une pluviométrie plus importante (figure 1).

Dans le cas de Tureia, c'est la consommation importante de fruits d'arbres et plus particulièrement de noix de coco (eau de coco et coprah), dont les activités massiques de césium 137 sont nettement plus élevées que celles dans les autres localités, qui sont à l'origine des doses plus élevées, le césium 137 contribuant à hauteur de 68% à 88% des doses par ingestion pour cette localité.

3.3.4 Contribution des radionucléides aux doses par ingestion

Le tableau 3 montre que les principaux radionucléides contributeurs aux doses par ingestion de denrées contaminées par les retombées globales des essais nucléaires atmosphériques, potentiellement reçues en Polynésie française et calculées par l'IRSN dans la présente étude, sont aussi les principaux contributeurs aux doses correspondantes estimées par l'UNSCEAR à l'échelle mondiale (tableau 1). Toutefois, en raison d'activités de césium 137 plus élevées dans les denrées terrestres polynésiennes (Cf. chapitre 3.2), la contribution de ce radionucléide aux doses par ingestion de denrées est presque toujours largement prépondérante ; elle représente entre 23% et 88% de ces doses, un peu plus faible aux Gambier que pour les cinq autres sites. Les contributions du carbone 14 et du strontium 90 sont du même ordre de grandeur pour l'ensemble des sites.

Les contributions des isotopes du plutonium sont comme attendu très faibles ; elles ne dépassent pas 6,3%. Celles du cobalt 60 qui ne résultent quasiment que de la consommation des bénéitiers ou de turbos, reste également en deçà de 7,3% (valeur atteinte aux Gambier en raison d'activités massiques de ce radionucléide relativement plus élevées dans les bénéitiers ; figure 5).

Enfin, pour Tureia et les Gambier en 1975 et en 1976, il faut noter une contribution non négligeable de radionucléides de période radioactive plus courte (^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{95}Zr ...) rémanent de la campagne d'essais français de 1974, voire de celle de 1973 ; cette contribution aux doses par ingestion atteint jusqu'à 13% aux Gambier en 1976 et 16% à Tureia en 1975 et décroît rapidement les années suivantes, 7% aux Gambier et 2,4% à Tureia dès 1977.

	Tureia %	Gambier %	Papeete %	Hitiaa %	Paea %	Teahupoo %
^{137}Cs	69 – 88	24 – 52	58 – 76	57 – 72	46 – 61	44 – 64
^{14}C	5,1 – 8,4	15 – 39	14 – 22	9 – 15	15 – 24	15 – 20
^{90}Sr	1,1 – 15	16 – 27	5,5 – 18	10 – 21	17 – 27	13 – 32
Isotopes du Pu	1,1 – 2,4	1,9 – 6,3	0,9 – 1,6	1,9 – 3,9	3,4 – 5,6	3,4 – 5,3
^{60}Co	0,4 – 1,9	1,5 – 7,3	< 0,4 - 0,6	< 0,8 – 5,6	< 1,7 – 3,3	0,3 – 2,5
Autres	< 1,1 – 16	< 0,12 – 13	< 0,04 – 2,1	< 0,01 – 3,5	< 0,005 – 0,3	< 0,005 – 2,9

Tableau 3 - Gammes des contributions (en %) des radionucléides aux doses efficaces par ingestion (ration 1975) potentiellement reçues par des adultes ayant résidé en Polynésie française entre 1975 et 1981.

3.3.5 Comparaison des doses estimées dans cette étude et celles estimées par l'UNSCEAR pour l'hémisphère sud

Les doses par ingestion estimées dans cette étude sont, d'un ordre de grandeur, supérieures à celles estimées par l'UNSCEAR pour l'hémisphère sud (elles diminuent de 2,7 à 1,9 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ entre 1975 et 1981) [7]. Cet écart s'explique principalement par l'importance de l'incorporation par ingestion de césium 137 en Polynésie, elle-même liée aux activités élevées de ce radionucléide suite à des transferts sol-plante plus importants dans les denrées terrestres (Cf. paragraphe 3.2) et à des modes d'alimentation différents (consommation importante d'eau de coco, de coprah et de produits marins).

4 ESTIMATION DES DOSES EFFICACES ANNUELLES ENGAGEES LIEES A L'INHALATION DES RADIONUCLEIDES DANS L'AIR

4.1 Données utilisées et éléments méthodologiques

4.1.1 Données disponibles acquises par le LESE à partir de 1970

A partir de septembre 1970, des analyses par spectrométrie gamma ont été réalisées sur des filtres de collecte d'aérosols atmosphériques. Durant la période 1975-1981, ces filtres étaient prélevés tous les cinq jours et regroupés par deux pour être analysés (3 échantillonnages de 10 jours par mois à l'exception de quelques décades entre le 30 novembre 1974 et le 20 avril 1975) par la station de prélèvement à grand débit située à Mahina sur la côte nord de Tahiti. La [figure 10](#) présente les activités volumiques des émetteurs gamma mesurés dans l'air de janvier 1974 à décembre 1982 et la [figure 11](#) leur fréquence de détection. Le césium 137 est le plus fréquemment mesuré avec 114 résultats sur 252 décades entre 1975 et 1981 ; le cérium 144 qui est un contributeur potentiel majeur aux doses par inhalation ([tableau 1](#)) a été plus rarement mesuré (66 fois) ; les autres produits de fission (cérium 141, ruthéniums 103 et 106 et zirconium 95) ne l'ont été que ponctuellement. D'autres produits de fission de plus courtes périodes, notamment le baryum 140 et l'iode 131, ont été mesurés durant quelques semaines après le tir du 14 septembre 1974, mais n'ont plus été décelés par la suite. Le béryllium 7, d'origine cosmogénique (produit dans la haute atmosphère par spallation de l'azote et de l'oxygène), a aussi été mesuré. Sa concentration dans l'air au niveau du sol est plus élevée au printemps austral (septembre-novembre) comme c'est aussi le cas pour les radionucléides artificiels provenant du réservoir stratosphérique [24].

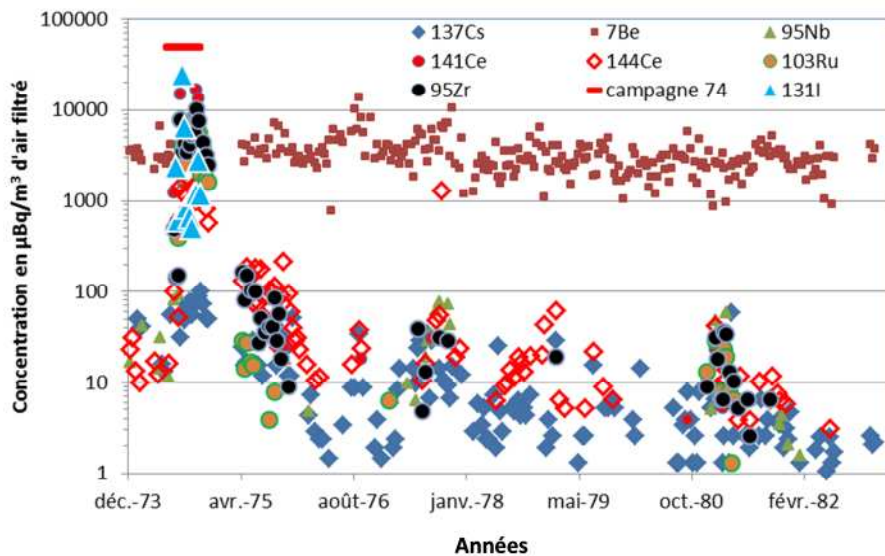


Figure 10 - Activités volumiques des principaux produits de fission émetteurs gamma mesurés sur des prélèvements d'aérosols prélevés sur filtres entre début 1974 et début 1982 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

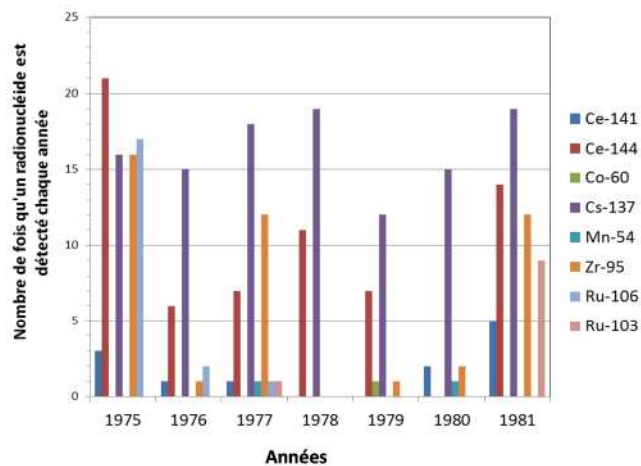


Figure 11 - Fréquence de la détection des produits de fission émetteurs gamma dans les aérosols prélevés à Mahina (Tahiti) entre 1975 et 1981.

4.1.2 Données reconstituées par l'IRSN sur la base des mesures disponibles

Les activités volumiques du ruthénium 106 (autre contributeur potentiel majeur, [tableau 1](#)), plus faibles que celles du cérium 144, ont été moins fréquemment quantifiées sur la période 1975-1981. Pour cette étude, un rapport d'activité $^{144}\text{Ce}/^{106}\text{Ru}$ égal à 1 a été utilisé pour estimer les activités volumiques du ruthénium 106 à partir de celles mesurées du cérium 144. Ce rapport d'activité a été estimé par l'UNSCEAR pour l'hémisphère sud ; il diminue de 1,6 pour l'année 1975, à 0,6 en 1981 du fait de la période radioactive du ruthénium 106 légèrement plus longue que celle du cérium 144 ([tableau 1](#)). Cette méthode permet de disposer de 66 valeurs pour le ruthénium 106 au lieu de 3 valeurs mesurées sur la période du 20 mars 1975 au 31 décembre 1981.

Pour combler l'absence de mesure entre le 30 novembre 1974 et le 20 avril 1975, les concentrations ont été estimées par interpolation exponentielle des activités mesurées entre le 30 septembre 1974 et le 30 novembre 1974 (figure 12). Les concentrations moyennes annuelles ont été calculées à partir de la moyenne arithmétique de l'ensemble des résultats positifs. Les valeurs indiquées comme nulles n'ont pas été prises en compte dans la moyenne.

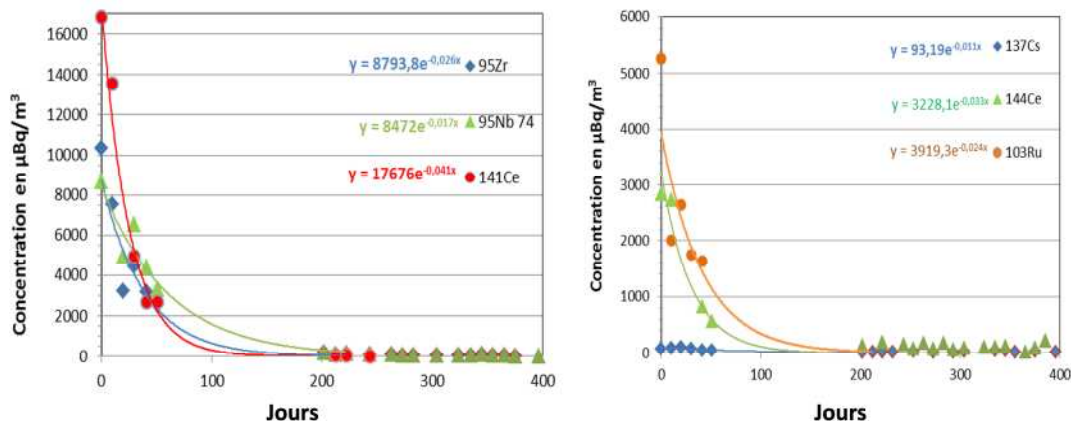


Figure 12 - Activités volumiques de l'air ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) des radionucléides émetteurs gamma dans les aérosols prélevés entre le 30 septembre 1974 et le 31 octobre 1975. Les points représentent les valeurs mesurées avant le 20 novembre 1974 et à partir du 20 avril 1975.

4.1.3 Données complémentaires acquises par l'IRSN pour la présente étude

Les isotopes 238, 239, 240 et 241 du plutonium, principaux contributeurs potentiels aux doses par inhalation (tableau 1), n'ont pas été mesurés à l'époque. Cependant les filtres d'aérosols prélevés par le LESE entre 1975 et 1981 ont été conservés au Laboratoire de mesure de la radioactivité de l'environnement (LMRE) de l'IRSN qui a pu effectuer en juin 2019 des analyses de ces radionucléides ainsi que de strontium 90 sur une sélection de 8 de ces filtres : 2 pour l'année 1975, et un pour chacune des années de 1976 à 1981¹⁴. Les activités volumiques présentes dans l'air à l'époque ont été reconstituées à partir de celles mesurées en 2019 en prenant en compte les décroissances radioactives. Notamment, avec une période radioactive de 14 ans, le plutonium 241 collecté à l'époque sur ces filtres s'est en grande partie désintégré (84% pour les échantillons de 1981 à 88 % pour ceux de 1975) produisant ainsi de l'américium 241 qui y a été mesuré en 2019. L'activité volumique du plutonium 241 dans l'air filtré de l'époque a donc été déduite de l'activité volumique d'américium 241 mesurée en 2019.

Les activités volumiques mesurées sont considérées représentatives des moyennes annuelles (moyennes de 2 résultats par radionucléide pour l'année 1975). Lorsque les résultats sont en limite de détection, les valeurs retenues pour ces calculs sont les limites de détection (cas du strontium 90 en 1978 et en 1981 et du plutonium 238 en 1980 et en 1981). Comme pour les produits de fission émetteurs gamma, le strontium 90 et les isotopes du Pu décroissent à partir de 1975 avec une légère augmentation en 1979 et en 1981 suite aux retombées stratosphériques des essais chinois (figure 13).

¹⁴ Ces analyses ayant conduit à la destruction de ces 8 filtres, une spectrométrie γ a également été réalisée en préalable pour comparaison avec les analyses faites à l'époque.

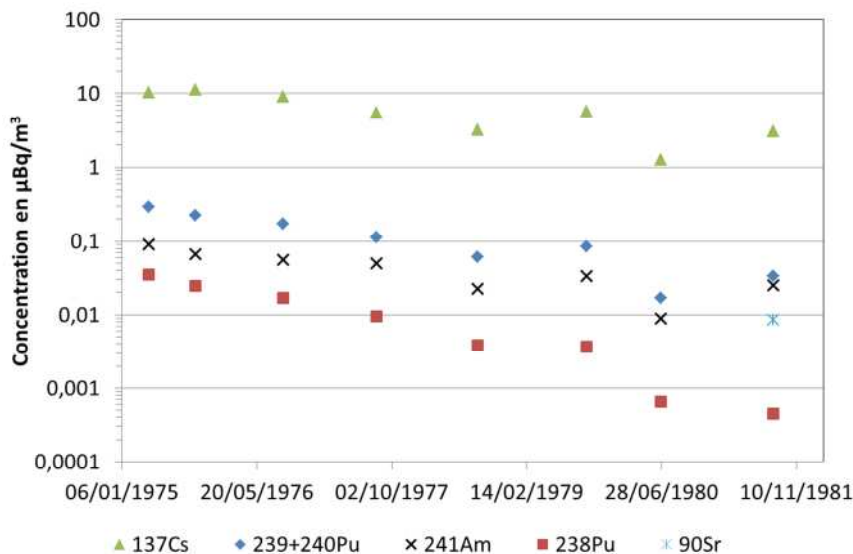


Figure 13 - Activités volumiques ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) des radionucléides mesurés en 2019 sur des aérosols prélevés sur filtres à Mahina entre 1975 et 1981.

4.1.4 Représentativité pour l'ensemble de la Polynésie française des activités mesurées dans l'air sur Tahiti

En 1975, quelques mois après le dernier essai nucléaire atmosphérique français, les radionucléides présents dans l'air en Polynésie provenaient presque exclusivement de retombées stratosphériques qui ont été assez homogènes tout autour du globe sur des bandes latitudinales de l'ordre de 10° de largeur [7, 28]. Pour cette raison, les activités volumiques de l'air mesurées à Tahiti (17°S) sont donc considérées comme représentatives de celles de l'ensemble de la Polynésie française (comprise entre 9°S et 27°S de latitude), notamment de celles des autres localités de la présente étude.

4.1.5 Débits respiratoires et facteurs de dose par unité d'incorporation

Pour estimer les doses efficaces annuelles résultant de l'incorporation par inhalation de ces activités volumiques dans l'air, les débits respiratoires de la CIPR-66 [35] ont été retenus (de $22,2 \text{ m}^3/\text{j}$, soit $8103 \text{ m}^3/\text{an}$ d'air inhalé pour un adulte à $5,16 \text{ m}^3/\text{j}$, soit $1883 \text{ m}^3/\text{an}$ d'air inhalé pour un enfant de 1 à 2 ans). Les facteurs de dose par unité d'incorporation (DPUI) sont ceux mentionnés pour les adultes dans l'arrêté du 1^{er} septembre 2003¹⁵ [25].

¹⁵ Les types d'absorption pulmonaires utilisés sont ceux recommandés dans le tableau 1.3 de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 à savoir le type « F » pour le césium 137 et le type « M » pour les autres radionucléides.

4.2 Doses efficaces liées à l'inhalation de radionucléides pour les résidents en Polynésie Française entre 1975 et 1981

La figure 14 présente les doses efficaces annuelles engagées estimées pour un adulte liées à l'incorporation par inhalation des radionucléides présents dans l'air en Polynésie française entre 1975 et 1981. Ces estimations, qui diminuent de 0,19 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en 1975 à 0,02 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en 1981, sont du même ordre de grandeur que celles faites par l'UNSCEAR [7] pour l'hémisphère sud et qui diminuent de 0,24 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en 1975 à 0,03 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en 1981. Les radionucléides impliqués dans ces doses sont également les mêmes que ceux indiqués par l'UNSCEAR (tableau 1), leurs contributions sur la période 1975-1981 sont de :

- 63% à 86% pour le plutonium, notamment les isotopes 239 et 240,
- 16% au maximum pour le cérium 144 et 12% au maximum pour le ruthénium 106 en 1977,
- 10% au maximum pour le zirconium-niobium 95 en 1975,
- 0,6% à 7,4% pour le strontium 90,
- 0,2% à 1,7% pour le césium 137.

Les autres radionucléides (manganèse 54, cobalt 60, ruthénium 103...), très rarement décelés, contribuent très faiblement à la dose à l'exception du $^{95}\text{Zr-Nb}$ en 1975 qui contribue pour près de 9% suite à la campagne des essais français de 1974.

Les doses efficaces dues à l'inhalation sont plus faibles pour les enfants que pour les adultes (figure 15) ; les coefficients de dose par unité d'incorporation, plus élevés pour les enfants que pour l'adulte, ne compensent pas complètement le fait que les enfants ont des débits respiratoires plus faibles que celui d'un adulte.

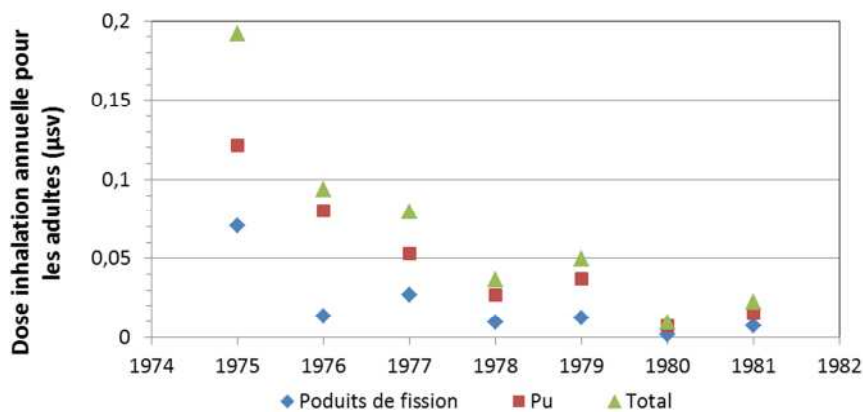


Figure 14 - Dose annuelle par inhalation pour les adultes résidants en Polynésie entre 1975 et 1981 (triangles verts). Les contributions des produits de fission et des isotopes (238, 239, 240 et 241) du plutonium sont indiquées respectivement par les losanges bleus et les carrés rouges.

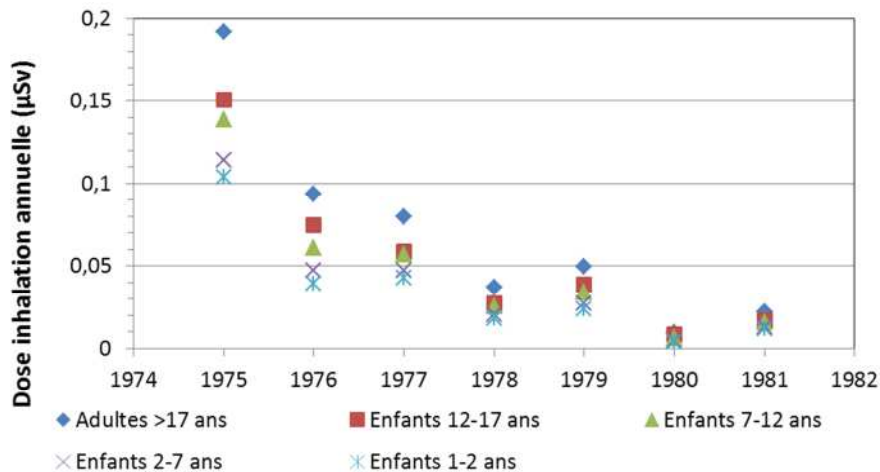


Figure 15 - Dose annuelle par inhalation pour les adultes et les enfants résidants en Polynésie entre 1975 et 1981.

5 ESTIMATION DES DOSES EFFICACES ANNUELLES LIEES A L'EXPOSITION EXTERNE AUX DEPOTS DE CESIUM 137

L'exposition externe ajoutée par la radioactivité artificielle est due aux radionucléides émetteurs gamma contenus dans les sols. Il s'agit quasi exclusivement du césium 137. Les principaux autres contributeurs à l'exposition externe durant la période des essais atmosphériques étaient le ⁹⁵Zr-Nb, le ¹⁴⁰Ba-La, le ¹⁰⁶Ru-Rh et le ⁵⁴Mn déposés majoritairement (70 %) avant 1965 et qui de par leurs périodes radioactives, de l'ordre d'une année ou moins, étaient en faibles quantités présents dans les sols entre 1975 et 1981¹⁶.

Des inventaires en césium 137 dans les sols pour différentes îles ont été effectués en 1982 [5]. En 2017 et 2018, l'IRSN a effectué de nouveaux inventaires pour Raiatea (île de La Société proche de Tahiti) et pour les Gambier (tableau 4) [28]. Les résultats de ces inventaires, corrigés de la décroissance radioactive, confortent ceux effectués en 1982. Les mesures effectuées en 1982 et en 2017-2018 indiquent que le césium 137 est enfoui à plusieurs centimètres de profondeur et que sa concentration diminue exponentiellement lorsque la profondeur augmente [28]. L'approche la plus pénalisante pour l'évaluation de l'exposition externe consisterait à considérer que toute l'activité est encore déposée en surface, ce qui n'est pas réaliste compte tenu qu'une part importante du césium 137 date des retombées mondiales des années 1965 et qu'une autre part provient des retombées des essais français entre 1966 et 1974. Avec des vitesses de migration verticale de l'ordre de 2 à 3 mm/an [28], une distribution homogène du césium 137 sur le seul premier centimètre de sol reste très majorante en termes d'exposition. Pour cette évaluation d'exposition externe, l'IRSN a retenu cette dernière hypothèse et la valeur du débit de dose par unité de surface, 0,0128 pSv/h par Bq/m², retenue par l'Agence de Protection de l'Environnement américaine [29] pour le césium 137 (le baryum 137m étant en équilibre).

Pour calculer les expositions entre 1975 et 1981, les activités surfaciques ont été établies pour chaque année pour les Gambier et Tahiti en tenant compte de la décroissance radioactive. Dans le cas de Tureia, comme pour les autres atolls des Tuamotu, les activités massiques en profondeur étant difficilement décelables déjà à l'époque, la valeur retenue est

¹⁶ D'après l'UNSCEAR [7] pour l'ensemble de la planète, la contribution à l'exposition externe liée au dépôt au sol du ¹³⁷Cs a varié de près de 92% à plus de 95% entre 1975 et 1981, le complément provenant du ⁹⁵Zr-Nb et du ¹⁴⁰Ba-La.

une valeur en excès évaluée à partir des limites de détection mesurées en 1982. Les autres paramètres retenus pour ce calcul sont un temps à l'intérieur des habitations de 30% (70% à l'extérieur) avec un facteur de protection de l'habitat de 50% (aucune protection à l'extérieur).

Les expositions entre 1975 et 1981 qui en découlent sont comprises entre 13,1 et 11,4 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ aux Gambier, entre 10,4 et 9,0 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ à Tahiti et à 2,7 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ à Tureia. Pour les îles hautes (Tahiti et Gambier), ces valeurs sont plus élevées que les valeurs moyennes indiquées par l'UNSCEAR [7] pour l'hémisphère sud (elles diminuent de 2,06 à 1,21 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ entre 1975 et 1981). Cet écart est dû à l'hypothèse choisie pour les calculs d'une activité contenue dans une épaisseur de sol de 1 cm seulement.

Tableau 4 - Activités surfaciques, en Bq/m^2 , du césium 137 mesurées en 1982 et en 2017-2018 (corrigées de la décroissance radioactive pour ramener les valeurs en 1975 et 1981) sur différents sites.

Archipel	Sites	Mesures effectuées en 1982 Bq/m^2	Mesures de 2017-2018 corrigées de la décroissance radioactive			
			Activités 1981 Bq/m^2 +/-		Activités 1975 Bq/m^2 +/-	
La Société	Plateau Hitiaa	960	946	52	1089	59
	Raiatea					
Tuamotu	Tureia (corail), Hao	280	Pas de mesure			
Gambier	Gambier 1 sableux	260-460	1190	61	1370	70
	Gambier 2	1930				

6 DOSES EFFICACES ANNUELLES TOTALES LIEES AUX RETOMBÉES DES ESSAIS ATMOSPHERIQUES D'ARMES NUCLEAIRES

6.1 Doses efficaces annuelles totales entre 1975 et 1981

La figure 16 et les tableaux 5 à 7 présentent les doses efficaces annuelles potentiellement reçues par des adultes polynésiens entre 1975 et 1981, qui résultent de l'ensemble des trois voies d'exposition (ingestion de denrées, exposition externe au césium 137 dans les sols et inhalation des radionucléides dans l'air). Ces doses, estimées avec la ration alimentaire de 1975, la plus pénalisante car correspondant à la plus forte autarcie alimentaire, n'ont pas excédé 70 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette valeur a pu être approchée à Tureia en 1976 (68 $\mu\text{Sv}/\text{an}$) alors que la dose estimée à Hitiaa n'a pas dépassé 49 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en 1975 et que les doses pour les quatre autres localités sont restées inférieures à 36 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ dès 1975. La figure 17 présente les évolutions comparatives de ces doses pour les enfants et les adultes résidents à Tureia et aux Gambier entre 1975 et 1981 et la figure 18 celles concernant les résidents des quatre localités de Tahiti. Ces doses se différencient peu en fonction des classes d'âge sauf à Tureia où les doses des populations adultes sont environ 30% plus élevées que celles des enfants. Cette différence est due principalement à l'ingestion de césium 137 contenu dans le coprah, avec une activité massique de 11 à 32 Bq/kg entre 1976 et 1981, plus fortement consommé par les adultes (80 kg/an) que par les enfants (50 à 60 kg/an).

La diminution de l'ordre d'un facteur 2 de ces doses au cours des années suivantes pour Tureia et les Gambier, de l'ordre de 30% pour les quatre autres sites, est directement liée à celle des doses consécutives à l'ingestion de denrées (Cf.

chapitre 3.3). En effet, les contributions des doses liées à l'ingestion de denrées aux doses totales sont prédominantes sauf aux Gambier où l'exposition externe est équivalente à la dose par ingestion d'aliments; elles représentent entre 56% et 79% des doses totales à Tahiti et jusqu'à 96% à Tureia pour les enfants comme pour les adultes; l'exposition externe représente le complément, la contribution de l'exposition par inhalation étant négligeable avec moins de 1% de la dose totale.

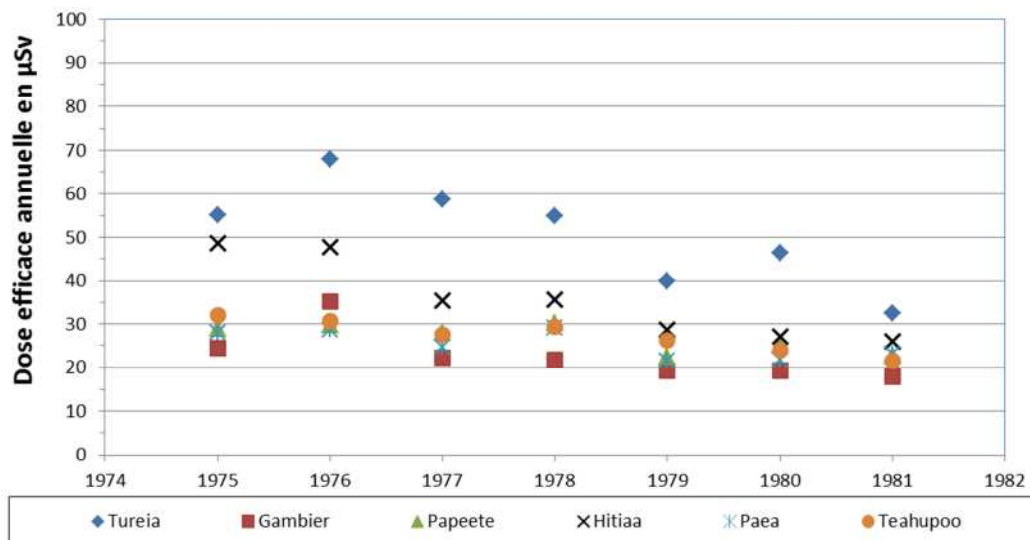


Figure 16 - Expositions annuelles ajoutées par les retombées radioactives des essais atmosphériques pour les adultes de Tureia, des Gambier et des quatre localités de Tahiti entre 1975 et 1981 (ration alimentaire de 1975 pour la dose par ingestion).

Tableau 5 - Expositions annuelles, en µSv, ajoutées par les retombées des essais nucléaires entre 1975 et 1981 pour les adultes de Tureia.

Tureia	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Exposition externe	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Inhalation	0,19	0,09	0,08	0,04	0,05	0,01	0,02
Ingestion (ration 1975)	52,2	65,3	56,1	52,2	37,1	43,8	29,7
Total	55,1	68,0	58,8	54,9	39,8	46,5	32,4

Tableau 6 - Expositions annuelles, en µSv, ajoutées par les retombées des essais nucléaires entre 1975 et 1981 pour les adultes des Gambier.

Gambier	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Exposition externe	13,1	12,8	12,5	12,2	11,9	12,2	11,4
Inhalation	0,19	0,09	0,08	0,04	0,05	0,01	0,02
Ingestion (ration 1975)	11,2	22,2	9,6	9,5	7,3	7,7	6,6
Total	24,4	35,1	22,2	21,7	19,3	19,3	17,97

Tableau 7 - Expositions annuelles, en μSv , ajoutées par les retombées des essais nucléaires entre 1975 et 1981 pour les adultes des quatre communes de Tahiti (Papeete, Hitiaa, Paea, Teahupoo).

Tahiti-Papeete	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Exposition externe	10,4	10,2	9,9	9,7	9,5	9,2	9,0
Inhalation	0,19	0,09	0,08	0,04	0,05	0,01	0,02
Ingestion (ration 1975)	18,2	19,6	18,0	20,5	12,9	15,7	13,5
Total	28,8	29,8	28,0	30,2	22,4	25,0	22,6

Tahiti-Hitiaa	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Exposition externe	10,4	10,2	9,9	9,7	9,5	9,2	9,0
Inhalation	0,19	0,09	0,08	0,04	0,05	0,01	0,02
Ingestion (ration 1975)	38,1	37,4	25,4	25,9	19,1	17,8	17,0
Total	48,7	47,7	35,4	35,6	28,7	27,1	26,0

Tahiti-Paea	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Exposition externe	10,4	10,2	9,9	9,7	9,5	9,2	9,0
Inhalation	0,19	0,09	0,08	0,04	0,05	0,01	0,02
Ingestion (ration 1975)	17,5	18,4	14,6	19,4	12,0	12,4	14,0
Total	28,1	28,6	24,6	29,1	21,5	21,7	23,0

Tahiti-Teahupoo	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Exposition externe	10,4	10,2	9,9	9,7	9,5	9,2	9,0
Inhalation	0,19	0,09	0,08	0,04	0,05	0,01	0,02
Ingestion (ration 1975)	21,5	20,5	17,5	19,7	16,6	14,7	12,4
Total	32,0	30,7	27,4	29,4	26,1	23,9	21,5

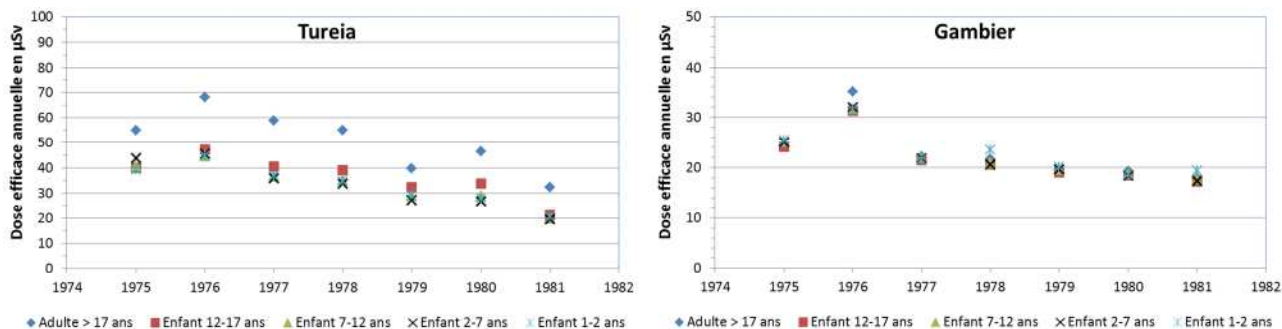


Figure 17 - Expositions annuelles ajoutées par les retombées radioactives des essais atmosphériques pour les adultes et les enfants âgés de plus d'un an de Tureia et des Gambier entre 1975 et 1981 (ration alimentaire de 1975 pour la dose par ingestion).

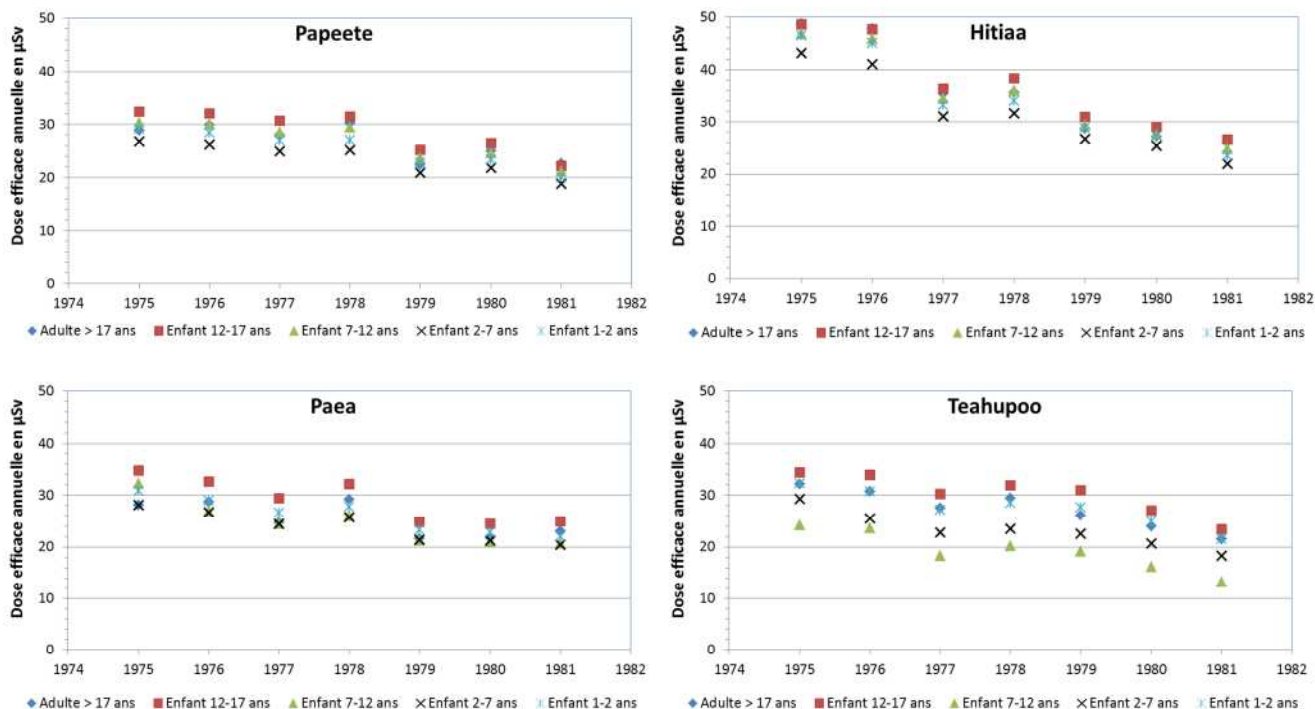


Figure 18 - Expositions annuelles ajoutées par les retombées radioactives des essais atmosphériques pour les adultes et les enfants âgés de plus d'un an des quatre localités de Tahiti entre 1975 et 1981 (ration alimentaire de 1975 pour la dose par ingestion).

6.2 Mise en perspective des doses calculées dans le cadre de cette étude et de celles calculées postérieurement à 1981

La [figure 19](#) présente l'évolution, entre 1975 et 2015, des doses efficaces annuelles totales, toutes voies d'exposition confondues, estimées pour les populations adultes des six localités étudiées. Cette évolution est principalement le reflet de celle des doses liées à l'ingestion de denrées.

Les doses annuelles totales estimées avec la ration alimentaire de 1982 diminuent régulièrement, sans discontinuité importante entre 1975 et 2015 ; notamment, les évaluations faites dans la présente étude pour la période 1975-1981 sont concordantes avec celles effectuées par l'IPSN puis l'IRSN pour les années suivantes. Une partie de la diminution, visible sur certaines localités, entre les doses totales estimées pour 1981 (dans le cadre de la présente étude) et celle estimées pour 1982, s'explique par la contribution du carbone 14 (pour une contribution de l'ordre de 2,5 μSv en 1981 non prise en compte dans l'estimation de 1982 ; voir le paragraphe 3.1.2) et par le choix pénalisant fait pour estimer la dose externe (voir chapitre 5).

Il est important de rappeler qu'à partir du milieu des années 1980, ces estimations de doses ne sont plus exclusivement liées aux retombées globales des essais nucléaires en Polynésie, mais aux principaux radionucléides artificiels présents dans les denrées consommées en Polynésie, quelles que soient leurs origines (locales ou importées). On peut noter à ce titre, en 1987, une augmentation importante mais ponctuelle des doses pour les quatre localités de Tahiti ; elle est liée à la consommation de denrées importées de l'hémisphère nord et marquées par les retombées de Tchernobyl (lait, riz, bière, farine et pain) (voir chapitre 3.1.5) ; très logiquement, cette augmentation n'est pas visible aux Gambier et à Tureia où ces importations étaient beaucoup moins importantes.

La valeur indiquée en 2016 pour les communes de Tahiti a été évaluée à partir d'activités mesurées dans des plateaux-repas collectés durant 5 jours, midi et soir, pour les denrées solides, ainsi que d'activités mesurées dans des denrées liquides pour lesquelles les quantités annuellement consommées sont les mêmes que celles utilisées pour les évaluations des années précédentes.

Les doses totales (toutes expositions confondues) estimées avec la ration alimentaire de 1975 pour les quatre sites de Tahiti pour la période 1975-1981 sont environ 30% plus élevées que celles estimées au moyen de la ration de 1982 en conséquence principalement de quantités de denrées locales consommées environ 2 fois plus importantes (voir le chapitre 3.1.5). Par contre, les doses estimées avec la ration de 1982 sont supérieures pour les années 1975 et 1981 à celles estimées avec la ration de 1975 aux Gambier car la consommation de viande de bœuf local dans la ration de 1982 est de 14,6 kg/an alors qu'elle est nulle dans la ration de 1975 ; la concentration du césium 137 dans cette viande étant relativement importante (de 0,8 à 32 Bq/kg durant la période 1975-1981) et très variable d'une année à l'autre comme cela est encore observé actuellement [26].

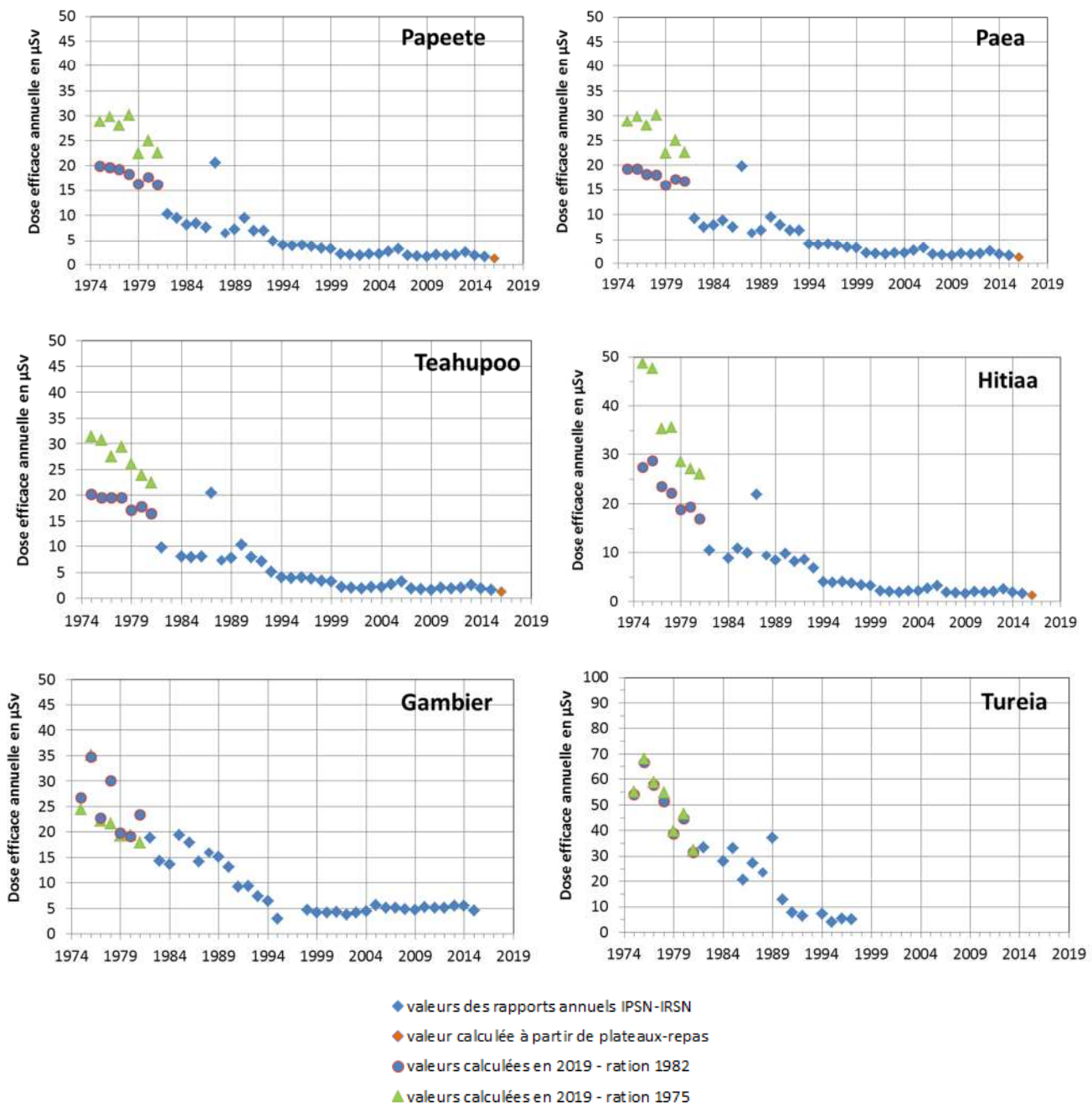


Figure 19 - Evolution dans le temps depuis 1975 des doses efficaces annuelles des populations adultes des six localités.

7 CONCLUSION

Les doses efficaces totales potentiellement reçues par un adulte ayant résidé dans une des six localités entre 1975 et 1981, et résultant des trois voies d'expositions précédentes, sont comprises entre 18 et 68 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ quelle que soit la ration alimentaire, avec des valeurs environ deux à trois fois plus élevées à Tureia sur l'ensemble de la période et deux fois plus élevées à Hitiaa durant les années 1975-1976 que pour les trois autres sites de Tahiti et des Gambier. Elles sont très majoritairement dues à l'ingestion de denrées locales sauf pour les Gambier où l'exposition externe contribue pratiquement autant que l'exposition par ingestion à la dose totale. Pour les enfants, les doses efficaces totales estimées sont pour la plupart très proches de celles des adultes. Pour la classe d'âges des 12-17 ans ayant résidés à Tahiti, elles peuvent être légèrement supérieures à celles des adultes, mais n'excèdent pas 49 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

Les estimations dosimétriques effectuées dans cette étude sont dans une large mesure basées sur des résultats de mesure et partant, aussi réalistes que possible. Lorsque des hypothèses ou des choix méthodologiques ont été faits, ils l'ont été en préférant ceux qui conduisent à une majoration des expositions. Les commentaires sur les doses estimées et notamment sur leurs composantes (contributions des radionucléides, des voies d'exposition, des éléments de scénario d'exposition...) ont été volontairement développés dans ce rapport de manière à permettre au lecteur d'identifier les choix ou paramètres les plus déterminants. Ainsi, parmi les choix les plus impactants sur les résultats de cette étude, figurent en premier lieu les rations alimentaires (pour les doses par ingestion) et la répartition du césium dans la profondeur des sols (pour les doses externes). La ration alimentaire de 1975 et plus particulièrement celle utilisée pour estimer les doses dans les communes rurales de Tahiti, illustre l'approche retenue par l'IRSN : la quantité totale de denrées solides d'origine locale consommée y est élevée alors que de nombreux produits comme les dérivés céréaliers (pain, pâtes, riz...) n'y sont pas considérés, car nécessairement importés en Polynésie. Dans le cas de l'exposition externe, le fait de considérer que le césium 137 était, entre 1975 et 1981, intégralement contenu dans le premier centimètre à la surface des sols est un choix vraisemblablement très majorant. Dans le cas des Gambier, pour lesquels la dose externe contribue à plus de 50% de la dose totale, ce choix pourrait correspondre à une majoration de quelques dizaines de pour cent des doses totales estimées pour les habitants de cet archipel.

Il convient de souligner que les évaluations faites dans le cadre de cette étude, sur la période 1975-1981, sont cohérentes avec celles effectuées par l'IPSN (puis l'IRSN) à partir de 1982.

Il convient de noter également que les résultats de mesure utilisés dans la présente étude ne permettent pas de distinguer les apports liés aux retombées des essais nucléaires français en Polynésie, de ceux liés à l'ensemble des essais atmosphériques d'armes nucléaires effectués par ailleurs par les USA, l'URSS, le Royaume-Uni, la France et la Chine.

Références

- [1] CIVEN - Courrier du 21 mars 2019 du Comité d'Indemnisation des victimes des essais nucléaires adressé au Directeur Général de l'IRSN.
- [2] Ministère de la Défense. La dimension radiologique des essais nucléaires en Polynésie. A l'épreuve des faits. ISBN 2-11-096780-3 (2006) 474p.
- [3] Agence Internationale de l'Energie Atomique. Rapport sur l'examen par des experts internationaux de l'exposition du public aux radiations en Polynésie française suite aux essais atmosphériques nucléaires français. Rapport AIEA (septembre 2009 - juillet 2010).
- [4] Rapport IRSN. Bilan de la surveillance de la radioactivité en Polynésie française en 2014 Synthèse des résultats du réseau de surveillance de l'IRSN (2015) 40p.
- [5] République française. Situation radiologique de la Polynésie française en 1982- Evolution depuis 1975. Vol.1 (1984) 24p.
- [6] République française. Situation radiologique de la Polynésie française en 1982- Evolution depuis 1975. Vol.2 (1984) 99p.
- [7] UNSCEAR: Source and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources. pp20-287, United Nations, New York, (2000).
- [8] Ph. Renaud, D. Louvat, F. Vray. Les retombées en France des essais atmosphériques d'armes nucléaires - Production, fractionnement, dispersion atmosphérique et dépôt des produits de fission. Rapport IRSN/DEI/SESURE n° 03-03 (2003) 43p.
- [9] F. Vray, Ph. Renaud. Contamination de la chaîne alimentaire par les produits de fission et d'activation émis lors des essais aériens d'armes nucléaires. Rapport DEI/SESURE n° 2004-19 (2004) 43p.
- [10] F. Vray, Ph. Renaud. Evaluation des conséquences dosimétriques des essais aériens d'armes nucléaires en France métropolitaine. Période 1961-1978. Rapport IRSN/DEI/SESURE n° 2006-03 (2006) 40p.
- [11] CEA/DIRCEN/SMCB. Contrôle biologique en Polynésie. 1975-1976. Rapport 01/78 tome 2, 200p. + annexes.
- [12] CEA/DIRCEN/SMCB. Contrôle biologique en Polynésie. 1977. Rapport 16/17 (15/01/1979), 123p. + annexes.
- [13] CEA/DIRCEN/SMCB. Contrôle biologique en Polynésie. 1978. Rapport 13/17 (12/07/1979), 119p. + annexes.
- [14] CEA/DIRCEN/SMCB. Contrôle biologique en Polynésie. 1979. Rapport 04/80 (19/08/1980), 116p. + annexes.
- [15] CEA/DIRCEN/SMCB. Contrôle biologique en Polynésie. 1980. Rapport 08/81 (24/11/1981), 102p. + annexes.
- [16] CEA/DIRCEN/SMCB. Dose engagée en 1981 aux populations par la consommation des aliments d'origine locale en Polynésie française et Intercomparaison. Rapport 08/14 (1982), 17p. + annexes.
- [17] S. Roussel-Debet. Evaluation des doses dues au carbone 14 depuis la fin des années 1950 en France métropolitaine. Rapport IRSN/DEI/SESURE 2006-09 (2006)
- [18] Q. Hua and M. Barbetti : Review of tropospheric bomb ^{14}C data for carbo cycle modelling and age calibration purposes. Radiocarbon, vol 46, n° 3 (2004), pp 1273-1298
- [19] C. V. Taros, C.E. Hughes, J.Crawford, S. E. Hollins, R. Chisari. Tritium in Australian precipitation : a 50 year record. Journal of hydrology 513 n° 14 (2014), pp262-373.
- [20] IRSN. Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2015 à 2017. Rapport IRSN-DG 2018-0006 (2018) 354p.
- [21] K. Hirose, M. Aoyama, M. Kukasawa, C.S. Kim, K. Komura, P.P. Povinec, J.A. Sanchez-Cabeza. Plutonium and ^{137}Cs in surface water of the south Pacific ocean. The Sciences of the total environment 381 (2007) pp 243-255.
- [22] H.D. Livingston, P.P. Povinec, T. Ito, O. Togawa. The behaviour of plutonium in the Pacific ocean. Crown copyright Elsevier Science Ltd (2001).

- [23] IAEA. Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in marine environment. Technical Report Series n° 422 (2004).
- [24] P. Bouisset, E. Barker, O. Masson, R. Gurriaran, X. Cagnat, M. Hadjaj. Concentration de ^{137}Cs dans les aérosols en France métropole et à Papeete (Tahiti) de 1959 à 2002. Congrès National de Radioprotection 'SFRP 2003' Montpellier (France) 11-13 juin 2003. Radioprotection 39 (2004) 357-381.
- [25] Journal officiel de la République française 58004. 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.
- [26] IAEA - Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfers in the terrestrial and freshwater environments. Technical Series n° 472. International Atomic Energy Agency (2010).
- [27] IRSN. Bilan de la surveillance de la radioactivité en Polynésie française en 2017-2018 - Synthèse des résultats du réseau de surveillance de l'IRSN. A paraître.
- [28] P. Bouisset, M. Nohl, A. Bouville, G. Leclerc. Inventory and vertical distribution of ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{238}Pu in soil from Raivavae and Hiva Oa, two French Polynesian islands in the southern hemisphere. J. Environ. Radioact. 183 (2018) 82-93.
- [29] United States Environmental Protection Agency (EPA): external exposure to radionuclides in air, water and soil; Federal Guidance Report n° 12 (1993).
- [30] Rapport IRSN : Bilan de la surveillance de la radioactivité en Polynésie française en 2016 Synthèse des résultats du réseau de surveillance de l'IRSN (2018) 40p.
- [31] EDF/R&D : Rations alimentaires des classes d'âge "enfants" - Enquête alimentaire autour du site de Chinon-Avoine : exploitation des résultats (2010).
- [32] E. Cohenny : Enquête alimentaire autour du Centre de Cadarache : Résultats et Analyse ; note technique CEA/DEN/CAD/DTN/SMTA/LMTE/NT/2019-15-INDICE A (2019).
- [33] IAEA : Assessment of doses to the public from ingested radionuclides ; Safety Report Series n° 14 (1999).
- [34] C. Grouzelle, M. Dominique, F. Lafay et R. Ducouso : Résultats d'une enquête alimentaire effectuée à Tahiti de 1980 à 1982 ; rapport CEA-R-5304 (1985).
- [35] CIPR-66 : Human respiratory tract model for radiological protection (1993).