

RAPPORT

EVALUATION DE L'EXPOSITION RADIOLOGIQUE DES POPULATIONS TAHITIENNES AUX RETOMBEES ATMOSPHERIQUES DE L'ESSAI CENTAURE (07/1974)

PSE-ENV

Rapport ASNR N° 2025-024

RÉSUMÉ

Mots clés : tir Centaure, retombées atmosphériques, Tahiti, évaluation dosimétrique

Les conséquences dosimétriques pour la population tahitienne des retombées radioactives de l'essai atmosphérique d'arme nucléaire « Centaure » de juillet 1974 ont été estimées par la Direction des Applications Militaires du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA, 2006) et plus récemment par Philippe *et al* (2022).

En 2021, suite à la publication du rapport d'expertise de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM, 2021), la Direction générale de la santé (DGS) a interrogé l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)¹ sur sa capacité à réaliser des travaux afin de répondre à une des recommandations de ce rapport : essayer d'affiner les estimations de doses reçues par les populations locales.

Cette demande a conduit l'IRSN à effectuer, au printemps 2021, des travaux préliminaires d'évaluation des doses reçues par la population de Tahiti à la suite de l'essai Centaure suivant une méthodologie assez différente de celle utilisée par le CEA (2006) et Philippe *et al.* (2021, 2022). Cette étude préliminaire a été présentée au Comité d'indemnisation des victimes des essais nucléaires (CIVEN) en juillet 2022, puis mentionnée le 23 mai 2024 lors de l'audition de l'IRSN par la Commission d'enquête parlementaire relative aux essais nucléaires français, à la suite de laquelle le Directeur général de l'institut a demandé la rédaction du présent rapport.

Lors des retombées radioactives de l'essai Centaure, la population de Tahiti a tout d'abord été exposée au rayonnement émis par les gaz et particules radioactives en suspension dans l'air ainsi qu'à leur inhalation durant le passage des masses d'air contaminées puis, par la suite, par exposition externe aux dépôts radioactifs et ingestion de denrées alimentaires contaminées.

Bien que de nombreuses mesures radiologiques aient été effectuées à Tahiti lors des retombées de l'essai Centaure et dans les semaines qui ont suivi, elles ne permettent pas à elles seules d'estimer les doses reçues par la population ; elles doivent être précisées et complétées par des estimations supplémentaires obtenues par calcul. Aussi, pour estimer les doses à la population, l'IRSN devenu ASNR a adopté une méthode qui repose sur l'utilisation combinée des résultats de mesures disponibles et d'un modèle dynamique de transferts des radionucléides dans l'environnement mis en œuvre dans la plate-forme de modélisation SYMBIOSE. Les résultats de mesure disponibles ont été utilisés comme données d'entrée du modèle, pour en ajuster certains paramètres ou valider les estimations d'activité et de débit de dose ambiant dans l'environnement. Les évolutions dans le temps et dans l'espace des niveaux de contamination ainsi réestimées ont permis ensuite d'évaluer les doses efficaces et équivalentes à la thyroïde reçues par les personnes de tous âges résidant sur les six localités choisies comme étant représentatives de la variabilité spatiale des expositions.

De manière générale, la méthode et les valeurs des paramètres utilisés dans cette étude, notamment les hypothèses faites pour les scénarios d'exposition, visent à reconstituer des doses « moyennes ». Bien que certains choix majorants (ou minorants) aient pu être identifiés, l'objectif n'était pas d'estimer les doses les plus élevées susceptibles de résulter de scénarios particulièrement pénalisants qui ont pu se produire.

Les doses efficaces ainsi calculées pour les douze mois qui ont suivi les retombées radioactives de l'essai Centaure varient de 0,4 mSv pour des adolescents ou des adultes résidant à Taravao, à 5,6 mSv pour des enfants de 1 à 2 ans résidant à Hitiaa. De manière générale, les doses les plus faibles sont celles estimées pour les adultes et les doses les plus élevées sont celles estimées pour les très jeunes enfants. Pour toutes les classes d'âge, les doses efficaces les plus élevées sont estimées là où les dépôts radioactifs les plus importants ont été mesurés – Hitiaa et Teahupoo/plateau de Taravao. A l'inverse, les doses les plus faibles concernent les zones où les dépôts ont été les plus faibles – Papeete et Taravao. Les doses à la thyroïde varient entre 3 mSv et 59 mSv en suivant les mêmes logiques d'analyse liées aux classes d'âge et aux lieux de résidence. Les doses

¹ En 2025, l'IRSN a fusionné avec l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) pour former une nouvelle entité, l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR).

efficaces résultent principalement de l'ingestion de denrées et plus particulièrement de l'incorporation d'iode 131 via la consommation de légumes et de lait ainsi que de l'exposition externe aux dépôts d'un nombre restreint de radionucléides (tellure-iode 132, baryum-lanthane 140, zirconium-niobium 95 et ruthénium 103). Les doses équivalentes à la thyroïde résultent essentiellement de l'incorporation d'iode 131 par ingestion de denrées (à plus de 80%) via la consommation de légumes et de lait de vache.

Ces résultats de calcul sont entachés d'incertitudes qui n'ont pas été évaluées précisément dans cette étude préliminaire. Ces incertitudes résultent tout d'abord des résultats de mesures radiologiques qui, malgré leur nombre, ne permettent pas toujours de caractériser ou valider de manière détaillée l'évolution des niveaux d'activité dans l'espace, dans le temps et pour l'ensemble des compartiments de l'environnement impliqués dans l'exposition des populations. On peut néanmoins noter que c'est pour les radionucléides et les denrées qui contribuent le plus aux doses par ingestion (notamment l'iode 131 dans les légumes et dans le lait de vache) que le nombre de données disponibles permet le meilleur ajustement du modèle. Une autre source d'incertitude non moins importante provient du manque d'information spécifique sur certains paramètres d'exposition tels que les rations alimentaires humaines et animales ou l'origine des denrées consommées sur chacune des localités considérées dans notre étude.

L'existence de ces incertitudes nous amène à considérer que seuls les ordres de grandeurs sont à retenir : les doses efficaces consécutives aux retombées de l'essai Centaure sur Tahiti estimées dans cette étude sont de l'ordre du millisievert, allant de moins de 1 millisievert à quelques millisieverts ; les doses équivalentes à la thyroïde estimées vont de quelques millisieverts à quelques dizaines de millisieverts. De même, concernant les écarts dans les doses estimées pour les six localités géographiques considérées, on retiendra que c'est probablement, et très logiquement, là où les dépôts ont été les plus importants que les doses ont pu être les plus élevées, en gardant à l'esprit que l'origine des denrées consommées a pu être à l'origine de singularités (par exemple la consommation de denrées produites sur une zone fortement touchée par les dépôts par des personnes résidant sur une localité beaucoup moins touchée, et inversement). *A fortiori*, cette étude qui fournit des estimations moyennes sur une population ne permet pas d'individualiser des calculs de doses.

Enfin, il est important de noter que les doses calculées dans cette étude sont du même ordre de grandeur que celles calculées par le CEA (2006) et Philippe *et al* (2021,2022), étant entendu que ces études présentent, elles-aussi, des incertitudes importantes pour les raisons évoquées ci-dessus.

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION.....	9
2	L’ESSAI CENTAURE.....	10
3	EXPOSITION DES POPULATIONS AUX RETOMBÉES DE L’ESSAI CENTAURE	12
4	METHODE D’ESTIMATION DES DOSES REÇUES	12
4.1.	Méthodologie générale	12
4.2.	Estimation des activités dans l’air, les dépôts et les eaux de boisson.....	13
4.3.	Estimation des doses par inhalation et doses externes panache	14
4.4.	Estimation des doses externes dues aux dépôts radioactifs	14
4.5.	Estimation des doses par ingestion de denrées contaminées	15
4.6.	Régionalisation des calculs de dose.....	17
5	RESULTATS & DISCUSSION.....	19
5.1.	Débits de dose ambiants	19
5.2.	Doses efficaces.....	20
5.3.	Doses équivalentes à la thyroïde.....	23
6	CONCLUSION.....	27
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	29
	ANNEXE 1 : ACTIVITE VOLUMIQUE ET COMPOSITION ISOTOPIQUE DE L’AIR	31
	ANNEXE 2 : DEBITS DE DOSE ET ACTIVITES DEPOSEES	34
	ANNEXE 3 : ACTIVITES MASSIQUES DANS LES EAUX DE BOISSON ET LES DENREES	37
	Les données disponibles	37
	Modélisation des chroniques d’activités massiques dans les denrées	39
	ANNEXE 4 : SCENARIOS D’EXPOSITION	44
	ANNEXE 5 : RESULTATS DOSIMETRIQUES COMPLEMENTAIRES	46

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1. Hypothèses retenues pour les dépôts atmosphériques, l'activité volumique intégrée durant le passage du nuage et les précipitations journalières pendant et après le passage du nuage.</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 2. Dose efficace totale estimée pour la première année suivant les dépôts (mSv).</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 3. Dose équivalente à la thyroïde estimée pour la première année suivant les dépôts (en mSv).....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 4. Liste et caractéristiques des principaux radionucléides présents dans le terme source, lesquels sont classés par contribution décroissante. D'après CEA (2006).</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 5. Comparaison entre les ratios isotopiques prédits et mesurés (rapport entre la contribution d'un radionucléide et celle de l'iode 131).....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 6. Dépôts ajoutés mesurés du 19 au 24 juillet 1974 au PCR de Mahina (d'après SMSR, 1975).</i>	<i>35</i>

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Simulation numérique de la dispersion atmosphérique du nuage radioactif issu du tir Centaure à l'aide du code HYSPLIT (d'après Philippe et al., 2022). Activité moyenne de l'air en pCi/m^3 ($1 pCi = 0.037 Bq$) entre 0 et 500 m d'altitude.	10
Figure 2. Cartographie des activités surfaciques (en valeurs relatives par rapport à l'activité mesurée à Mahina) établie par le SMSR par mesures de l'ambiance gamma le long des routes et des chemins. D'après SMSR (1974 a). Document déclassifié.	11
Figure 3. Représentation schématique de la méthodologie utilisée par l'ASNR pour estimer les doses à la population tahitienne dues aux retombées de l'essai atmosphérique Centaure.	13
Figure 4. Evolutions comparées des activités volumiques modélisées (courbes) et observées (points) dans le lait de vache à Hitiaa, Teahupoo-Plateau de Taravao et Taravao.	16
Figure 5. Evolutions comparées des activités modélisées (courbes) et observées (valeurs mensuelles) dans les mollusques de lagon (bénitier) collectés au marché de Papeete, à Hitiaa et Teahupoo.	16
Figure 6. Hypothèses de régionalisation des dépôts, activités dans l'air et précipitations journalières durant l'épisode de contamination des 19 et 20/07/1974 (les dépôts et activités sont exprimées relativement aux valeurs rapportées à Mahina).	18
Figure 7. Evolutions comparées du débit de dose ambiant (en $mRad/h$ ou nSv/h) simulées et observées (d'après SMSR, 1975, via deux graphes renumérisés) à Mahina et Taravao.	19
Figure 8. Dose efficace totale estimée pour la première année suivant les dépôts par classe d'âge et localité (mSv).	20
Figure 9. Contribution des voies d'atteinte à la dose efficace à un an, par localité, pour le très jeune enfant (1-2 ans) et pour l'adulte.	21
Figure 10. Contribution des radionucléides (en %) à la dose efficace totale reçue au bout d'un an par le très jeune enfant (1-2ans) à Hitiaa.	22
Figure 11. Contribution des radionucléides (en %) à la dose efficace totale reçue au bout d'un an par l'adulte à Teahupoo.	22
Figure 12. Cinétique d'engagement de la dose efficace du très jeune enfant (1-2 ans) à Hitiaa, par voie d'atteinte.	23
Figure 13. Dose équivalente à la thyroïde estimée pour l'année suivant les dépôts par classe d'âge et localité (mSv).	24
Figure 14. Contribution des voies d'atteinte à la dose équivalente à la thyroïde sur l'année suivant les dépôts, par localité, pour le très jeune enfant (1-2 ans) et pour l'adulte.	25
Figure 15. Contribution des radionucléides (en %) à la dose thyroïde totale reçue au bout d'un an par le très jeune enfant (1-2ans) à Taravao.	26
Figure 16. Contribution des radionucléides (en %) à la dose thyroïde totale reçue au bout d'un an par l'adulte à Teahupoo.	26
Figure 17. Cinétique d'engagement de la dose thyroïde du très jeune enfant (1-2ans) à Hitiaa, par voie d'atteinte.	27
Figure 18 Evolutions temporelles de l'activité volumique de l'air (en pCi/m^3) et du débit de dose ambiant (en $mrad/h$) enregistrées à Mahina et Taravao de juillet à septembre 1974. D'après SMSR (1975).	31

Figure 19. Evolutions temporelles du débit de dose ambiant (en mrad/h) enregistrées à Mahina et Taravao du 19 au 21 juillet 1974. D'après SMSR (1975).	34
Figure 20. Cartographie des activités surfaciques (en valeurs relatives par rapport à l'activité mesurée à Mahina) établie par le SMSR par mesures de l'ambiance gamma le long des routes et des chemins. D'après SMSR (1974 a).	35
Figure 21. Evolution dans le temps de l'activité mesurée pour quelques produits de fission à vie courte dans les légumes feuille collectés à Hitiaa de juillet 1974 à juin 1975 (données journalières sous forme de points et mensuelles sous forme de traits). L'absence de traits reflète l'absence de données en moyenne mensuelle.	37
Figure 22. Cartographie des mesures d'activité réalisées dans l'air, l'eau de boisson et les denrées consommées dans les mois qui ont suivis les retombées.	38
Figure 23. Evolutions comparées de l'activité dans l'eau de boisson (en Bq/l) mesurée (points) et estimée (lignes) à Hitiaa d'après la chronique d'activité globale dans l'eau et la composition isotopique de l'air.	39
Figure 24. Evolutions comparées des activités massiques modélisées et observées dans les légumes feuille collectés à Hitiaa, Papeete et Teahupoo.	41
Figure 25. Evolutions comparées des activités massiques modélisées et observées dans les œufs de poule à Mahina, Hitiaa et Teahupoo	41
Figure 26. Evolutions comparées des activités massiques modélisées et observées dans la viande (de nature indéterminée) au marché de Papeete dans l'hypothèse où nous considérons qu'il s'agit d'une viande de bœuf (a), de porc (b) ou de poulet (c).	42
Figure 27. Evolutions comparées des activités massiques modélisées et observées dans la viande au marché de Taravao dans l'hypothèse où nous considérons qu'il s'agit d'une viande de bœuf (a), de porc (b) ou de poulet (c).	42
Figure 28. Evolutions comparées des activités modélisée et observée (valeurs journalières) dans les poissons de lagon (espèces variées) et les bénitiers collectés au marché de Taravao.	43
Figure 29. Evolutions comparées des activités modélisée et observée (valeurs mensuelles) dans les poissons de lagon (espèces variées) collectés au marché de Papeete, à Hitiaa et Teahupoo.	43
Figure 30. Contribution des radionucléides à la dose efficace externe aux dépôts à un an, du très jeune enfant à Hitiaa, prédite par SYMBIOSE.	46
Figure 31. Contribution des radionucléides à la dose efficace externe aux dépôts à un an, du très jeune enfant à Papeete, prédite par SYMBIOSE.	46
Figure 32. Contribution des radionucléides à la dose efficace externe aux dépôts à un an, du très jeune enfant à Teahupoo, prédite par SYMBIOSE.	46
Figure 33. Contribution des radionucléides à la dose efficace ingestion à un an, du très jeune enfant à Hitiaa, prédite par SYMBIOSE.	47
Figure 34 Contribution des radionucléides à la dose efficace ingestion à un an, du très jeune enfant à Papeete, prédite par SYMBIOSE.	47
Figure 35. Contribution des radionucléides à la dose efficace ingestion à un an, du très jeune enfant à Teahupoo, prédite par SYMBIOSE.	47
Figure 36. Contribution des radionucléides à la dose efficace inhalation à un an, du très jeune enfant et de l'adulte à Hitiaa, prédite par SYMBIOSE.	48

Figure 37. Contribution des radionucléides à la dose efficace inhalation à un an, du très jeune enfant et de l'adulte à Papeete, prédite par SYMBIOSE.	49
Figure 38. Contribution des radionucléides à la dose efficace inhalation à un an, du très jeune enfant et de l'adulte à Teahupoo, prédite par SYMBIOSE.	49
Figure 39 : Répartition par aliment de la dose efficace par ingestion à 1 an, pour le très jeune enfant (1-2 ans) (les contributions inférieures à 5% sont rassemblées dans 'Autres ').	50
Figure 40 : Répartition par aliment de la dose efficace par ingestion à 1 an, pour l'adulte (les contributions inférieures à 5% sont rassemblées dans 'Autres ')	51
Figure 41 : Répartition par aliment de la dose thyroïde par ingestion à 1 an, pour le très jeune enfant (1-2 ans) (les contributions inférieures à 5% sont rassemblées dans 'Autres ')	52
Figure 42 : Répartition par aliment de la dose thyroïde par ingestion à 1 an, pour l'adulte (les contributions inférieures à 5% sont rassemblées dans 'Autres ')	53

1 INTRODUCTION

Entre 1966 et 1974, la France a procédé à quarante-et-un essais atmosphériques d'armes nucléaires (hors essais « de sécurité ») depuis les atolls de Mururoa et Fangataufa. Six d'entre eux ont entraîné des retombées radioactives plus importantes sur certaines îles habitées de Polynésie Française, dont l'archipel des Gambier, l'atoll de Tureia et Tahiti.

Les doses² liées aux expositions radiologiques des populations consécutives à ces six essais, dont l'essai Centaure qui a impacté l'île de Tahiti en juillet 1974, ont été estimées par la Direction des Applications Militaires du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA, 2006).

En 2021, à la suite de la sortie du rapport d'expertise de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM), la Direction générale de la santé (DGS) a interrogé l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)³ sur la possibilité pour cet Institut d'effectuer des travaux afin de répondre à une des recommandations de ce rapport : essayer d'affiner les estimations de doses reçues par les populations locales.

Cette demande a conduit l'IRSN à effectuer, au printemps 2021, des travaux préliminaires d'évaluation des doses reçues par la population de Tahiti à la suite de l'essai Centaure suivant une méthodologie assez différente de celle utilisée pour l'étude du CEA. Cette méthode repose, notamment, sur la prise en compte des transferts des radionucléides dans l'environnement par l'utilisation de sa plate-forme de calcul SYMBIOSE qui permet de reconstituer les évolutions temporelles des niveaux de contamination des différentes composantes de l'environnement, notamment les denrées, à partir des résultats de mesure disponibles.

Cette étude préliminaire a été présentée au Comité d'indemnisation des victimes des essais nucléaires (CIVEN) en juillet 2022.

Les doses consécutives aux retombées de l'essai Centaure ont aussi été évaluées par Philippe *et al* (2021, 2022). Suivant la compréhension que l'ASNR a de ces articles, ces auteurs se sont appuyés sur les estimations faites par le CEA en 2006 et d'autres documents déclassifiés en 2013. Pour obtenir de nouvelles estimations, les auteurs ont modifié les valeurs de quelques paramètres, notamment le dépôt radioactif initial ainsi que des hypothèses de scénario d'exposition des populations. Ces modifications conduisent à des doses plus élevées que celles calculées par le CEA.

Enfin, l'étude préliminaire présentée au CIVEN ayant été mentionnée le 23 mai 2024 lors de l'audition de l'IRSN par la Commission d'enquête parlementaire sur les conséquences des essais nucléaires en Polynésie française, le Directeur général de l'institut a demandé la rédaction du présent rapport.

² La dose permet de quantifier l'exposition d'une personne à des rayonnements ionisants. Dans cette étude, on distingue deux types de dose : la dose efficace qui permet de quantifier et de comparer les différentes expositions auxquelles a été soumise la population tahitienne en prenant en compte les spécificités des différents radionucléides et de l'ensemble des organes exposés ; la dose équivalente à la thyroïde qui permet de quantifier spécifiquement l'atteinte de cet organe plus particulièrement exposé après l'essai Centaure. Ces doses s'expriment en millisievert (mSv).

³ Au 1^{er} janvier 2025, l'IRSN a fusionné avec l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) pour former une nouvelle entité, l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR).

2 L'ESSAI CENTAURE

L'essai atmosphérique d'arme nucléaire Centaure a été déclenché sur l'atoll de Mururoa (en zone Denise) le 17 juillet 1974 à 8h (heure locale), depuis un ballon dirigeable à 270 m d'altitude. L'explosion a généré un nuage radioactif dont le plafond a atteint une altitude maximale de 5200 m, très inférieure à l'altitude escomptée initialement de 8500 m. Contrairement aux prévisions qui prédisaient des retombées radioactives au Nord, le nuage a été transporté vers l'ouest-nord-ouest à une vitesse moyenne de l'ordre de 20 km/h, atteignant ainsi l'île de Tahiti dans la journée du 19 juillet, moins de 2 jours après l'explosion. Le rapport de campagne du Service Mixte de Surveillance Radiologique indique ainsi (SMSR, 1975) : *"On constate que la couche du nuage radioactif se déplaçant à faible altitude a suivi une trajectoire Tematangi-Hereheretua-Tahiti, le niveau de la retombée de Tahiti étant principalement dû aux pluies de la nuit du 18 au 19 et de la journée du 19 juillet."*

Les simulations numériques de la dispersion atmosphérique réalisées par Philippe et al. (2021, 2022) donnent une idée plus précise des échelles de temps et d'espace caractéristiques probables de cet épisode de transport (cf. Figure 1).

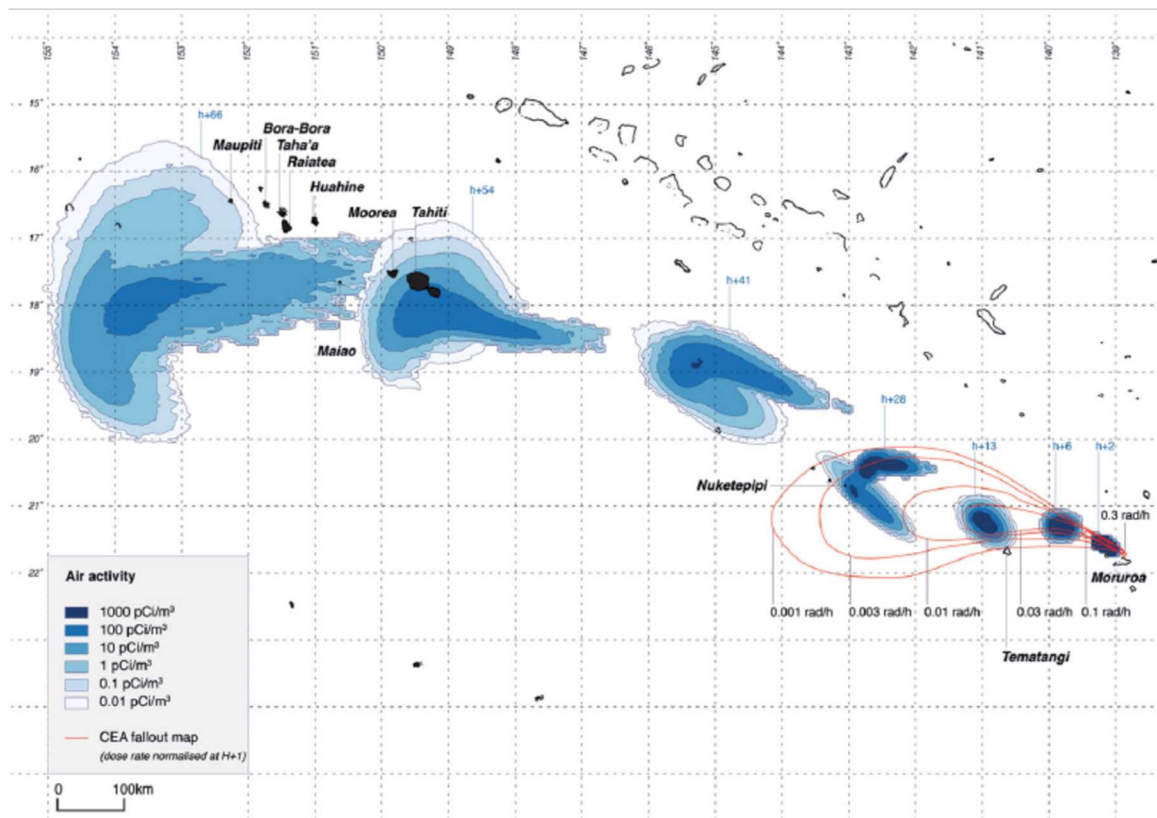


Figure 1. Simulation numérique de la dispersion atmosphérique du nuage radioactif issu du tir Centaure à l'aide du code HYSPLIT (d'après Philippe et al., 2022). Activité moyenne de l'air en pCi/m³ (1 pCi = 0.037 Bq) entre 0 et 500 m d'altitude.

Ainsi qu'en attestent les mesures effectuées par le Service Mixte de Surveillance Radiologique (SMSR, 1975), l'arrivée du nuage sur Tahiti a occasionné une brusque augmentation de la contamination de l'air et du rayonnement ambiant, ce dernier ayant atteint sa valeur maximale sur l'île entre 48 et 54 heures après le tir. La survenue de précipitations intermittentes et de forte intensité, conjuguée aux effets de blocage des masses d'air par le relief, a occasionné des dépôts radioactifs très hétérogènes qui ont été jusqu'à 100 fois plus importants très localement dans le sud de l'île que dans l'Ouest (cf. Figure 2).

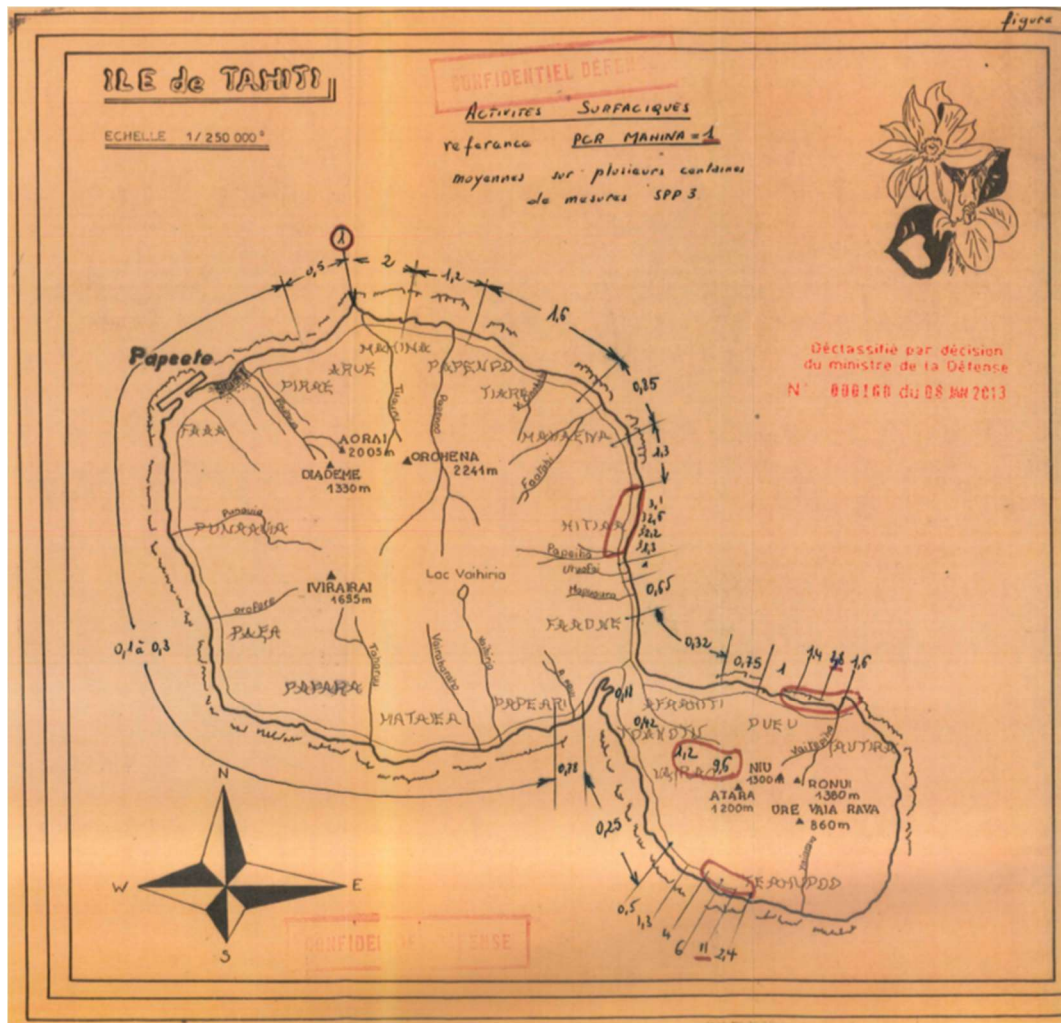


Figure 2. Cartographie des activités surfaciques (en valeurs relatives par rapport à l'activité mesurée à Mahina) établie par le SMSR par mesures de l'ambiance gamma le long des routes et des chemins. D'après SMSR (1974 a). Document déclassifié.

La composition isotopique des masses d'air radioactives à leur arrivée sur l'île le 19 juillet, soit 54 heures après le déclenchement du tir, a été estimée par le CEA (2006) à l'aide de la base de données JEFF (2005). Le spectre ainsi établi comporte près de 75 radionucléides principaux, 90 % de l'activité globale étant portée par 25 contributeurs majoritaires dont des isotopes de l'iode, du tellure et du xénon. La majorité d'entre eux avaient des périodes radioactives allant de quelques heures à quelques dizaines de jours.

3 EXPOSITION DES POPULATIONS AUX RETOMBÉES DE L'ESSAI CENTAURE

Lors des retombées radioactives de l'essai Centaure, la population de Tahiti a tout d'abord été exposée au rayonnement émis par les gaz et les particules radioactives en suspension dans l'air et à leur inhalation.

La population a ensuite été exposée aux dépôts radioactifs qui se sont formés lors du passage de ces masses d'air. En effet, des matières radioactives se sont déposées sur tout ce qui se trouve à la surface du sol et de manière plus importante lors des pluies.

Ces dépôts radioactifs sont principalement à l'origine de trois types d'expositions de la population : une exposition externe à leur rayonnement, une exposition par inhalation de poussières radioactives remises en suspension par le vent et une exposition par ingestion des denrées alimentaires qu'ils ont contaminées. Les débits de dose associés à ces trois voies d'exposition ont vraisemblablement atteint un maximum dans les premiers jours ou toutes premières semaines suivant les dépôts, pour ensuite décroître assez rapidement en raison de la décroissance des radionucléides de courte période radioactive et de différents mécanismes d'élimination et de dilution dans l'environnement. Ainsi, l'essentiel des conséquences radiologiques de l'essai Centaure sur la population tahitienne ont résulté des expositions lors des premières semaines qui ont suivi les retombées radioactives. Toutefois, pour cette étude, les doses ont été estimées pour les douze mois qui les ont suivies afin d'estimer des doses annuelles.

4 METHODE D'ESTIMATION DES DOSES REÇUES

4.1. Méthodologie générale

Estimer les doses liées aux principales voies d'exposition de la population tahitienne mentionnées précédemment, nécessite de disposer d'une connaissance de l'évolution dans le temps et dans l'espace des données radiologiques suivantes :

- Les activités volumiques des radionucléides dans l'air (en Bq/m³) lors du passage des masses d'air contaminées sur l'île,
- Les activités surfaciques des radionucléides qui se sont déposés à la surface du sol et des eaux de surface (en Bq/m²),
- Les activités massiques de ces radionucléides dans les denrées produites localement (en Bq/kg de masse fraîche).

Des mesures de débit de dose, d'activités volumiques, surfaciques et massiques ont été effectuées par les deux services en charge de la surveillance radiologique en Polynésie lors des essais nucléaires : le Service Mixte de Contrôle Biologique (SMCB) et le Service Mixte de Sécurité Radiologique (SMSR). Toutefois, pour les raisons qui seront détaillées ci-après, ces mesures ne permettent pas à elles seules d'estimer les doses reçues par la population ; elles doivent être précisées ou complétées par des données supplémentaires obtenues par calcul sur la base d'hypothèses.

Aussi, pour estimer les doses à la population, l'ASNR a adopté la méthode représentée schématiquement dans la Figure 3 qui sera détaillée par la suite. Cette méthode repose sur l'utilisation combinée des résultats de mesures disponibles et d'un modèle dynamique de transferts des radionucléides dans l'environnement mis en œuvre dans sa plate-forme SYMBIOSE. Les résultats de mesure disponibles sont utilisés, soit comme données d'entrée du modèle, soit pour en ajuster certains paramètres en comparant les résultats de calculs aux mesures in situ. Les évolutions des niveaux de contamination des différentes composantes de l'environnement ainsi

estimées, permettent ensuite d'évaluer les expositions radiologiques des populations via l'utilisation d'un modèle d'évaluation dosimétrique également mis en œuvre dans SYMBIOSE.

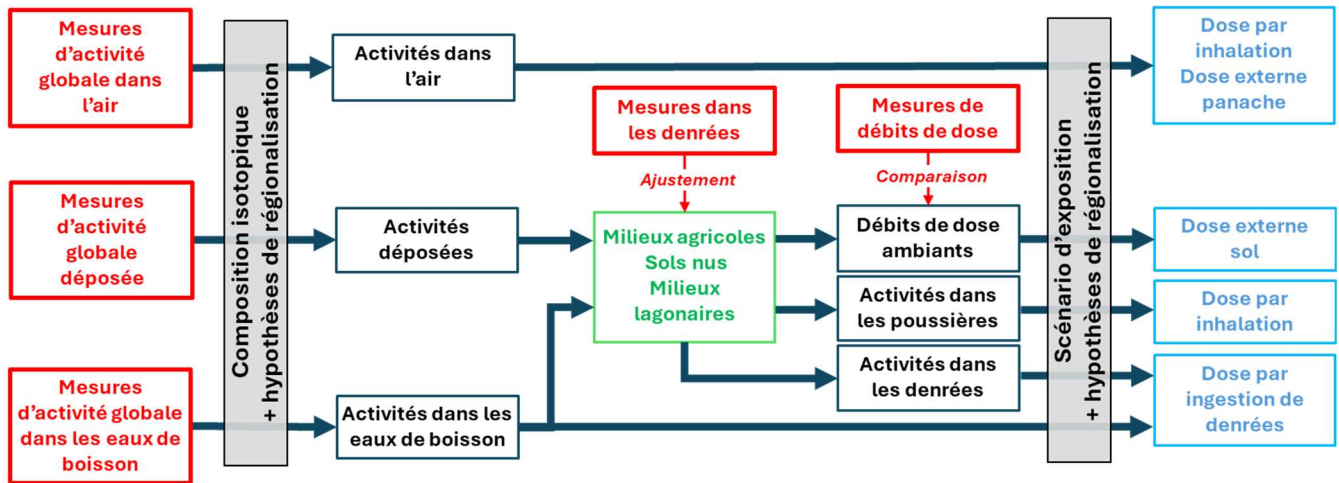


Figure 3. Représentation schématique de la méthodologie utilisée par l'ASNR pour estimer les doses à la population tahitienne dues aux retombées de l'essai atmosphérique Centaure.

De manière générale, l'approche calculatoire adoptée dans cette étude (choix des méthodes de modélisation, valeurs de paramètre, hypothèses de calcul et scénarios d'exposition) vise à reconstituer des doses « moyennes ». Bien que certains choix majorants⁴ aient pu être identifiés (et d'autres minorants), l'objectif n'est pas d'estimer les doses les plus élevées susceptibles de résulter de scénarios particulièrement pénalisants qui ont pu se produire.

4.2. Estimation des activités dans l'air, les dépôts et les eaux de boisson

Les mesures effectuées à Tahiti après l'essai Centaure sont le plus souvent des mesures de radioactivité globales⁵ qui ne permettent pas de différencier les radionucléides en présence. Or les doses reçues par la population dépendent des caractéristiques très différentes de ces radionucléides : périodes radioactives, types de rayonnements, radiotoxicité par ingestion et par inhalation... Pour déterminer les activités de chacun de ces radionucléides à partir des activités globales mesurées le 19 juillet 1974 dans l'air, dans les dépôts et dans les eaux de boisson, l'ASNR a utilisé l'estimation théorique fournie par le CEA pour un délai de 54 heures après le tir (voir l'annexe 1 sur la composition isotopique de la radioactivité de l'air). Les contributions de chacun des radionucléides présents dans les retombées de l'essai Centaure sur Tahiti, exprimées en pourcentage de l'activité globale mesurée, sont appelées « spectre » dans la suite de cette étude. La composition isotopique de l'air en

⁴ Concernant les produits laitiers par exemple, dont la consommation est une composante majeure de l'exposition de la population, on considère qu'ils sont issus du lait produit localement (Taravao et Hitiaa) et consommés par toute la population, y compris les nourrissons.

⁵ Il s'agit de la mesure de l'indice d'activité bêta-globale (β -globale). Cet indice permet de quantifier l'activité d'un ensemble de radionucléide émetteur β dans un échantillon. Il peut s'exprimer en Bq, Bq/kg (dans les denrées par exemple), ou Bq/m³ (dans l'air ou dans des eaux...). La plupart des radionucléides émetteurs β peuvent contribuer à l'indice β global avec un rendement qui dépend de l'énergie. L'indice β global ne correspond pas à la somme des activités des radionucléides émetteurs β contenus dans l'échantillon mesuré. Il ne permet pas de distinguer les radionucléides en présence et n'est donc pas directement utilisable pour effectuer des évaluations dosimétriques. La mesure de l'indice β -globale était très répandue jusqu'au début des années 2000 en raison de sa facilité et rapidité d'obtention. Les mesures d'activités déposées et de débits de dose ont été réalisées au moyen de détecteurs portables de terrain de type SPP3 (Scintillateur portable de prospection) très utilisé à l'époque qui mesure le rayonnement gamma d'ambiance sans différencier les radionucléides qui en sont à l'origine.

date du 20 juillet ainsi que celle des masses d'air résiduelles ayant occasionné de faibles dépôts atmosphériques dans les deux semaines qui ont suivi (du 21 juillet au 6 août 1974) ont, quant à elles, été réestimées en faisant évoluer le spectre théorique établi le 19 juillet sous l'effet des processus de décroissance et filiations radioactives. L'évolution dans le temps des activités de chacun des radionucléides présents dans l'air, les dépôts ou les eaux de boisson et d'abreuvement a donc été déduite de l'évolution des activités globales mesurées dans chacune de ces composantes en appliquant l'évolution du spectre recalculée précédemment dans l'air sur toute la période considérée.

4.3. Estimation des doses par inhalation et doses externes panache

Sur cette base, les doses par inhalation de gaz et de particules présents dans le panache radioactif et les doses externes dues au panache ont été estimées au moyen de scénarios d'expositions dont les principaux éléments sont les durées d'exposition, les débits respiratoires, ainsi que de coefficients de dose exprimés en Sv/Bq inhalé et en Sv/h par Bq/m³ pour l'exposition externe (voir l'annexe 4). Il a été considéré que la contamination de l'air à l'intérieur des habitations était égale à celle de l'air extérieur (pas de protection apportée par les habitations).

Il est important de mentionner que les activités globales dans l'air ont été mesurées sur des filtres qui ne représentent que la fraction particulaire de la radioactivité présente dans l'air. Or, certains radionucléides du spectre pouvaient être présents sous forme gazeuse. C'est notamment le cas du tritium et de l'iode. Pour cette étude, le tritium a supposé être présent sous forme de vapeur d'eau tritiée. Dans le cas de l'iode, le choix a été fait de considérer qu'il était présent exclusivement sous forme particulaire. Ce choix résulte, d'une part de l'absence de données sur sa répartition entre ses formes gazeuses et particulaire dans l'air lors des retombées de l'essai Centaure, et d'autre part, du constat de rapports d'activités isotopiques cohérents lorsqu'on le considère exclusivement sous la forme particulaire (voir l'annexe 1). Toutefois, il faut souligner qu'à la suite des accidents de Tchernobyl et de Fukushima, il a été observé que l'iode dans l'air se trouvait majoritairement sous forme gazeuse, moléculaire notamment. Le choix de considérer que tout l'iode atmosphérique a été particulaire ayant des conséquences minorantes sur la dose par inhalation (les coefficients de dose de l'iode moléculaire sont plus élevés que ceux de l'iode particulaire), les doses par inhalation sont aussi calculées en faisant l'hypothèse que l'iode particulaire ne représentait que le quart de l'iode totale présent dans l'air, les trois autres quarts l'étant sous forme gazeuse moléculaire ; ceci revient à multiplier par 4 les activités volumiques de l'iode dans l'air sous forme particulaire pour prendre en compte cette forme gazeuse.

4.4. Estimation des doses externes dues aux dépôts radioactifs

Des mesures de débit de dose ont été effectuées en différents points de l'île au cours des tous premiers jours par le SMSR (voir annexe 2). Il s'agit de mesures globales, faites avec des équipements portables qui ne permettent pas une caractérisation suffisamment précise des débits de dose ajoutés par les retombées de l'essai Centaure. Par ailleurs, contrairement aux expositions liées au passage des masses d'air, l'exposition externe aux radionucléides déposés à la surface du sol perdure dans le temps. De plus, le débit de dose évolue au cours du temps en raison de plusieurs phénomènes : la diminution des activités surfaciques des radionucléides par décroissance radioactive, la création de nouveaux radionucléides du fait de cette désintégration (filialités radioactives), la migration des radionucléides vers la profondeur du sol... C'est pourquoi, pour estimer les doses externes à la population dues aux dépôts radioactifs, le choix a été fait de modéliser les débits de dose ambiants à partir des activités prédites dans les sols en utilisant SYMBIOSE (cf. *Figure 3*).

Ces débits de dose sont ensuite confrontés aux débits de doses mesurés par le SMSR (voir la *Figure 7* du chapitre 5.1). Des scénarios d'exposition dont les principaux paramètres sont les temps de présence à l'extérieur et à l'intérieur des habitations ainsi que la protection apportée par l'habitation contre le rayonnement émis par le sol, permettent ensuite d'estimer les doses aux populations.

4.5. Estimation des doses par ingestion de denrées contaminées

Les niveaux de contamination des denrées produites à Tahiti après l'essai Centaure ont été mesurés par le SMCB (CEA, 2006 ; SMCB, 1975a,b) dans des échantillons prélevés *in situ* ou collectés sur les marchés locaux et en laiterie. Ces analyses ont principalement porté sur les eaux de boisson, les denrées issues de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche en lagon (voir annexe 3). A l'instar de l'air, il s'agit souvent de mesures de l'activité globale qui ne discriminent pas les différents radionucléides en présence. De plus, la contamination des denrées agricoles liée à l'interception des dépôts radioactifs par les feuilles des végétaux (denrées végétales ou destinées à l'alimentation des animaux) a fortement diminué dans les jours qui ont suivi les retombées de l'essai Centaure par décroissance radioactive et par différents phénomènes d'élimination et de dilution dans l'environnement (voir annexe 3). Or, les mesures réalisées par le SMCB n'ont pas été assez nombreuses et fréquentes pour restituer ces cinétiques d'évolution très rapides. Enfin, les mesures acquises dans les denrées ne sont pas suffisamment nombreuses et détaillées pour rendre compte de manière fiable de l'hétérogénéité spatiale des niveaux de contamination attendus d'une localité à l'autre.

C'est pourquoi, le choix a été fait pour cette étude d'utiliser SYMBIOSE pour reconstituer l'évolution dans le temps et dans l'espace des activités massiques des denrées consommées (en Bq.kg^{-1}) à partir des estimations de l'activité déposée quotidiennement du 19 juillet au 6 août 1974 (en $\text{Bq.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$). Les conditions d'utilisation des modèles et notamment leur paramétrage sont présentés en annexe 3.

L'environnement modélisé est constitué de deux types de milieu, le milieu agricole et les lagons, pour lesquels la voie de contamination prépondérante se fait par dépôts atmosphériques sec et/ou humide. Le milieu agricole est constitué majoritairement de pâturages (broués par le bétail), de cultures maraîchères (légumes feuille, fruit et racine) et d'élevages (bovin, volaille, porcin, ovin). Il inclut en outre des parcelles de sols non travaillées représentant des surfaces terrestres non cultivées. Les cultures fruitières n'ont pas été considérées dans cette étude préliminaire. L'abreuvement des animaux d'élevage par des eaux contaminées participe également à la contamination des denrées d'origine animale.

Afin d'estimer l'évolution dans le temps des activités massiques des radionucléides dans les denrées lagunaires, un modèle simplifié a été mis en œuvre. Dans ce modèle, le lagon est assimilé à un volume clos défini par une profondeur moyenne (m) et contaminé exclusivement par les dépôts radioactifs à sa surface, les apports par ruissellement à partir des bassins versants n'ayant pas été pris en compte⁶. Par souci de simplicité, l'activité volumique de l'eau dans le lagon (en Bq/m^3) n'évolue dans le temps que sous l'effet de la décroissance et des filiations radioactives, les processus d'interaction avec le fond du lagon (eg processus sédimentaires, adsorption/désorption de radionucléides, etc.) et les processus d'échange de masses d'eau avec la haute mer n'ayant pas été considérés (hypothèses maximisantes). Les activités massiques des produits de la pêche (Bq/kg) ont ensuite été estimées à partir de l'activité prédite dans l'eau (Bq/m^3) en utilisant un facteur de concentration à l'équilibre (Bq/kg par Bq/m^3).

Les quelques mesures d'activité disponibles dans les denrées agricoles ont, le cas échéant, été utilisées pour ajuster les prévisions du modèle, les principales variables d'ajustement étant la biomasse de l'herbe de pâture et les hauteurs de précipitation (cf. §4.6 pour plus de précision). La *Figure 4* illustre les résultats d'un tel ajustement dans le cas du lait de vache pour lequel les mesures disponibles sont les plus nombreuses, les plus régulières et les plus précises puisqu'elles distinguent quelques-uns des principaux radionucléides concernés. D'autres illustrations sont fournies en annexe 3.

⁶ Bien que ces processus aient pu opérer dans les semaines et les mois suivants à l'occasion d'épisodes pluvieux intenses et du fait d'une orographie marquée, ils ne peuvent être raisonnablement modélisés que moyennant une caractérisation fine des dépôts et de la pluviométrie (dans les terres intérieures notamment) ainsi qu'une connaissance approfondie du fonctionnement hydro-sédimentaire des bassins versants (non accessibles pour cette étude).

Les résultats de mesure de contamination dans les denrées issues du lagon (essentiellement poissons et mollusques) sont encore moins nombreux que ceux des denrées terrestres. Les valeurs des facteurs de transfert aux poissons (espèces indifférenciées) et mollusques de lagon (bénitier) ont été estimées par ajustement des prévisions aux observations rapportées par le SMCB de juillet 1974 à avril 1975, en moyenne mensuelle (cf. exemple d'ajustement obtenu pour les bénitiers en *Figure 5*).

Partant des activités massiques estimées dans les denrées agricoles et lagunaires, les doses par ingestion ont ensuite été calculées sur la base de scénarios d'exposition dont les principaux paramètres sont les rations alimentaires et le lieu de production des aliments (voir le chapitre 4.6).

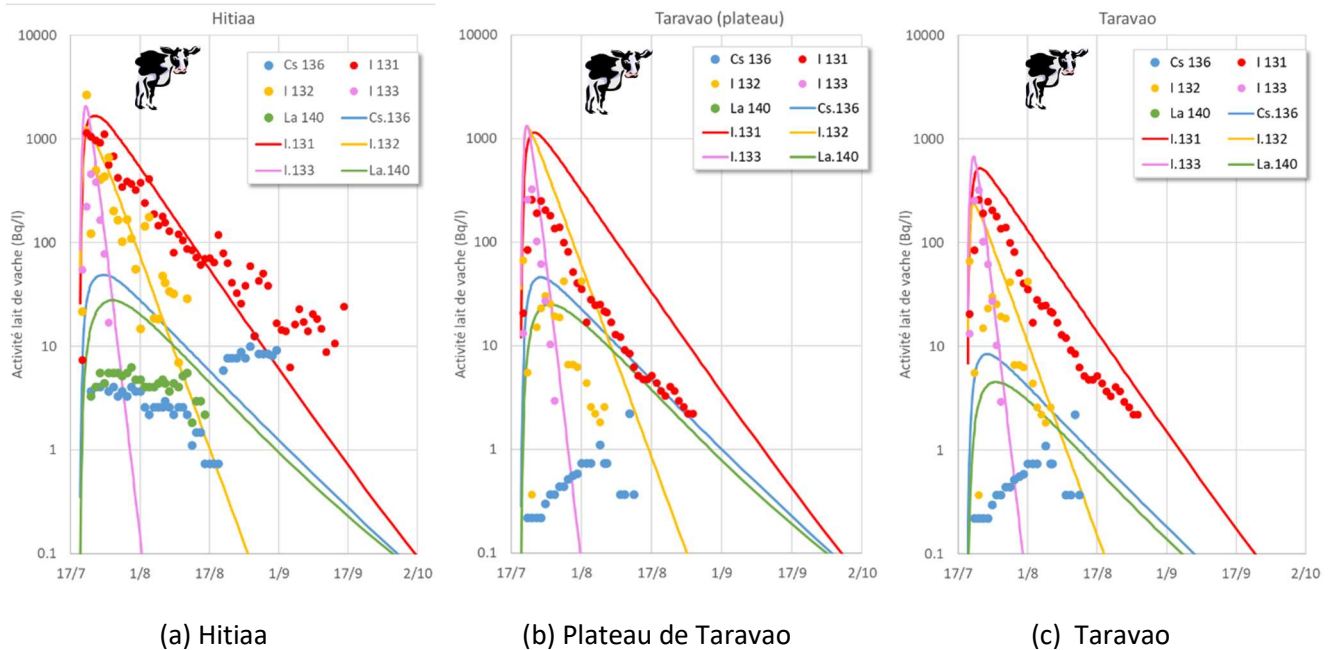


Figure 4. Evolutions comparées des activités volumiques modélisées (courbes) et observées (points) dans le lait de vache à Hitiaa, Teahupoo-Plateau de Taravao et Taravao.

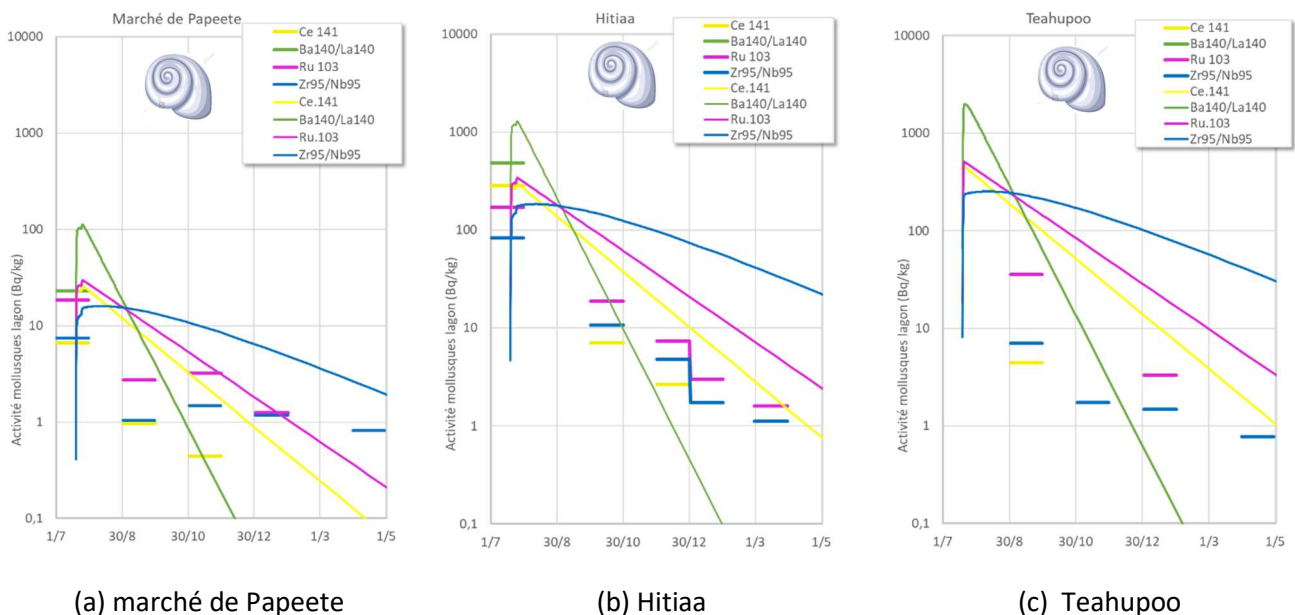


Figure 5. Evolutions comparées des activités modélisées (courbes) et observées (valeurs mensuelles) dans les mollusques de lagon (bénitier) collectés au marché de Papeete, à Hitiaa et Teahupoo.

4.6. Régionalisation des calculs de dose

Comme indiqué au chapitre 2, les dépôts radioactifs sur l'île de Tahiti consécutifs à l'essai Centaure ont été très hétérogènes. Cette variabilité des retombées a induit une variabilité spatiale des expositions de la population.

Afin d'en rendre compte, les évaluations dosimétriques ont été réalisées pour six localités touchées de manière contrastée par les retombées radioactives, trois d'entre elles étant situées sur l'île principale (Papeete, Mahina et Hitiaa), les trois autres se situant sur la presqu'île de Taiarapu (Taravao, Pueu et Teahupoo)⁷. Nous avons fait le choix de regrouper la localité de Teahupoo avec la zone de pâturage d'altitude se situant sur le plateau de Taravao, les dépôts y étant assez similaires. Ce panel de localités reflète assez bien la diversité des situations radiologiques rencontrées. Les évaluations ont été effectuées en adoptant un paramétrage du modèle qui tient compte de la spécificité géographique des dépôts sec et humide, activités volumiques dans l'air et les eaux de boisson et pluviométrie, notamment. Les hypothèses retenues sur chacune des 6 localités sont synthétisées dans le *Tableau 1*.

Les chroniques d'activité globale journalière dans l'air (en Bq/m³) enregistrées par le SMSR du 19 juillet au 6 août 1974 montrent que les deux premières journées ont très majoritairement contribué à l'activité intégrée sur cette période, i.e. à hauteur de 629 et 333 Bq/m³ j sur un total de 637 et 334 Bq/m³ j, respectivement à Mahina et Taravao. Pour les quatre autres localités où nous ne disposons d'aucune donnée, nous avons attribué l'une ou l'autre de ces deux valeurs selon un critère de proximité spatiale en ne considérant que deux régions distinctes, l'une au Nord rattachée à Mahina, l'autre au Sud rattachée à Taravao (cf. *Figure 6*).

Les mesures rapportées par le SMSR du 19 au 29 juillet 1974, montrent que l'activité globale déposée à Mahina à l'issue de cette période est de 3,64 MBq/m², les journées des 19 et 20 ayant contribué à hauteur de 3,36 MBq/m². Comme indiqué *Figure 2*, les mesures effectuées par le SMSR en d'autres points de l'île ont permis d'établir une carte des activités déposées sur ces points. Les valeurs retenues dans l'étude pour chacune de ces 6 localités sont répertoriées *Figure 6*. On considère par exemple que les activités déposées à Papeete ont été 5 fois plus faibles qu'à Mahina (facteur multiplicatif = 0,2) et 4 fois plus fortes à Teahupoo ou sur le plateau de Taravao qu'à Mahina (facteur multiplicatif = 4). Ces valeurs sont des « moyennes » locales ; les valeurs maximales représentatives de petites surfaces n'ont pas été retenues, conformément à la démarche générale édictée au paragraphe 4.1.

Les activités déposées résultent à la fois de dépôts par temps sec et de dépôts liés aux précipitations (dépôts humides). Les contributions respectives des dépôts secs et humides aux activités surfaciques mesurées constituent des données d'entrée des modèles mis en œuvre dans SYMBIOSE et doivent être estimées. A Papeete, les dépôts radioactifs se sont constitués majoritairement par temps sec les 19 et 20 juillet. Le rapport entre le dépôt mesuré à Papeete (Bq/m²) et l'activité volumique de l'air intégrée durant le passage des masses d'air (en Bq/m³ j) enregistrée au Poste de Contrôle Radiologique (PCR) de Mahina, situé non loin de Papeete, fournit une estimation de la vitesse de dépôt sec moyenne de l'ordre de 1,24 cm/s (soit $0,2 \times 3,36 \cdot 10^6$ Bq/m² / 629 Bq/m³ j). Cette valeur permet ensuite d'évaluer la contribution du dépôt sec en d'autres points de l'île où l'activité dans l'air y a été mesurée ou estimée. La contribution des dépôts humides a ensuite été déduite en soustrayant le dépôt sec au dépôt radioactif total mesuré. Ces valeurs sont aussi reportées dans le *Tableau 1*.

La hauteur caractéristique du (ou des) épisode(s) pluvieux ayant occasionné les dépôts humides des 19 et 20 juillet 1974 est un paramètre très sensible car il détermine en grande partie la fraction effectivement interceptée par les végétaux (i.e. voie foliaire) et donc les niveaux de contamination à court et moyen termes dans les légumes, l'herbe de pâturage ainsi que la viande et le lait des animaux nourris à l'herbe. Il est donc primordial de déterminer des hauteurs caractéristiques telles que les activités prédites par le modèle dans ces denrées soient le plus proches possible des activités mesurées, en particulier dans le lait de vache et les légumes feuilles (pour

⁷ Bien que quelques données aient été acquises sur la commune de Paea, au Sud-Ouest de l'île principale, nous ne l'avons pas intégrée dans les évaluations parce que la situation radiologique rencontrée et les doses calculées s'apparentent à celles de Papeete (eg dépôts faibles à modérés, absence de précipitations marquées lors des dépôts des 19 et 20 juillet 1974).

lesquels les mesures sont les plus abondantes). Cela nous a conduit à retenir des hauteurs de 4, 8 et 16 mm respectivement pour Mahina, Hitiaa et la presqu’île de Taiarapu.

Tableau 1. Hypothèses retenues pour les dépôts atmosphériques, l’activité volumique intégrée durant le passage du nuage et les précipitations journalières pendant et après le passage du nuage.

Localité	Localisation	Dépôt total (Bq/m2)	Activité volumique de l'air intégrée (Bq/m3 j)	Pluie journalière (*) (l/m2/j)	Pluie moyenne journalière (**) (l/m2/j)	Dépôt sec (***) (Bq/m2)	Dépôt humide (Bq/m2)	Contribution du dépôt humide (%)
Mahina	île principale	3,64E+06	637	4	8	6,80E+05	2,96E+06	81%
Papeete	île principale	7,28E+05 (0,2xMahina)	637 (Mahina)	0	6	6,80E+05	4,77E+04	7%
Hitiaa	île principale	8,37E+06 (2,3xMahina)	637 (Mahina)	8	10	6,80E+05	7,69E+06	92%
Taravao	presqu'île de Taiarapu	7,28E+05 (0,2xMahina)	334	16	6	3,57E+05	3,71E+05	51%
Teahupoo (+ plateau de Taravao)	presqu'île de Taiarapu	1,46E+07 (4,0xMahina)	334 (Taravao)	16	6	3,57E+05	1,42E+07	98%
Pueu	presqu'île de Taiarapu	5,46E+06 (1,5xMahina)	334 (Taravao)	16	9	3,57E+05	5,10E+06	93%

(*) hauteur effective de précipitation estimée les 19 et 20 juillet 1974 à Hitiaa et sur le plateau de Taravao, par calage de l'activité modélisée dans le lait

(**) hauteur de précipitation moyenne journalière observée de juillet 1974 à juillet 1975 (réseau de stations météorologiques)

(***) valeur estimée à partir de l'activité volumique de l'air et d'une vitesse de dépôt sec ~1.24 cm/s

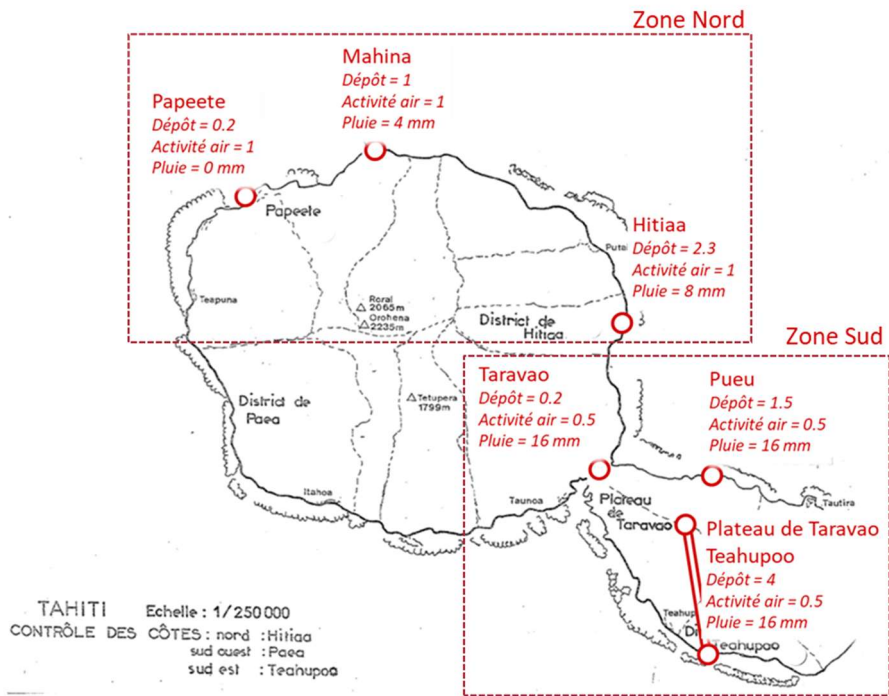


Figure 6. Hypothèses de régionalisation des dépôts, activités dans l’air et précipitations journalières durant l’épisode de contamination des 19 et 20/07/1974 (les dépôts et activités sont exprimées relativement aux valeurs rapportées à Mahina).

5 RESULTATS & DISCUSSION

5.1. Débits de dose ambiants

Les modèles implémentés permettent de simuler l'évolution temporelle du débit de dose efficace externe, exprimé en Sv/h, en tenant compte de l'exposition à la contamination du sol (non travaillé) et de l'immersion dans le panache. Les débits de dose efficace simulés (en Sv/h) à Mahina et Taravao sont comparés aux débits de dose ambiants mesurés (en rad/h) de juillet à septembre 1974, *Figure 7*, sachant que $100 \text{ rad} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ et que dans le système international d'unités, le Sievert est homogène au Gray (et donc au J/kg).

Le débit de dose simulé est largement dû à l'exposition aux dépôts sur le sol. Il décroît assez rapidement, de plus d'un ordre de grandeur le premier mois, essentiellement sous l'effet des processus de décroissance et filiation radioactives mais aussi de lixiviation par les pluies. Ainsi, s'il est dû les premiers jours essentiellement à des radionucléides à vie courte dont l'iode 132 (demi-vie d'environ 2h), le lanthane 140 (demi-vie 1,7 j), l'iode 133 (20 h) et les isotopes du niobium 97 (72 min) et 97m (moins d'une minute), il n'est plus dû au bout de six mois qu'à des radionucléides de demi-vie plus longue, e.g. niobium 95 (35j), zirconium 95 (64j), ruthénium 103 (39 j).

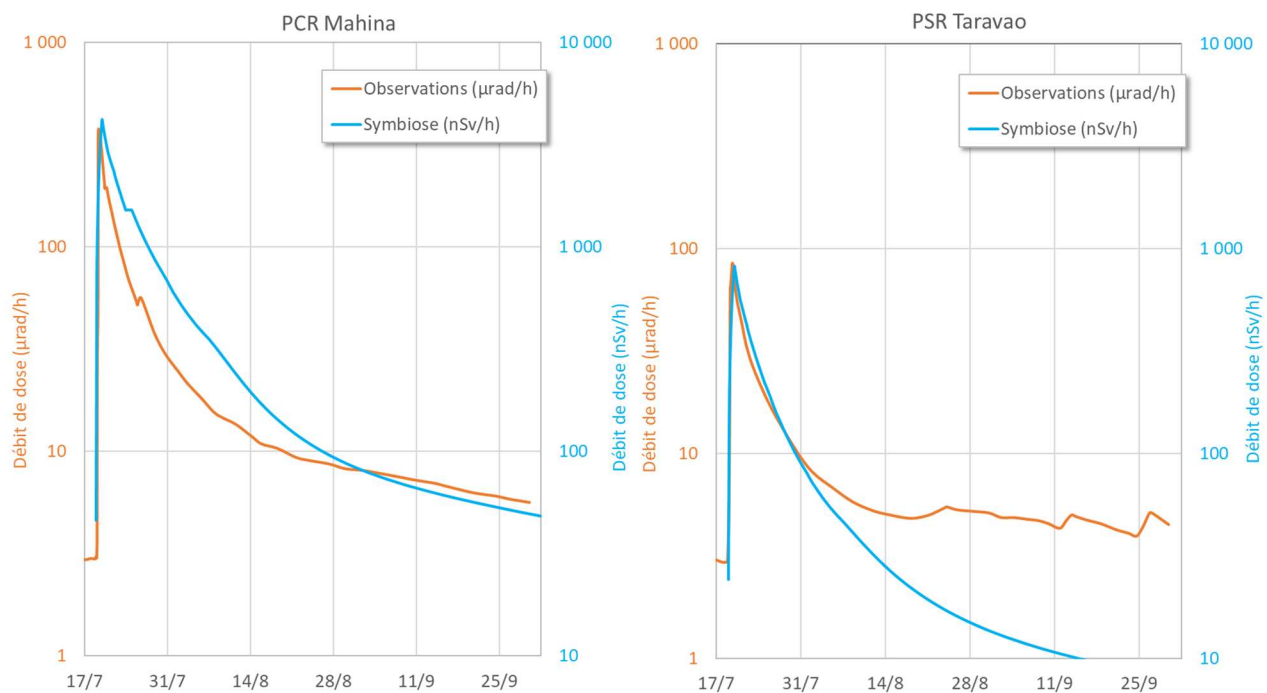


Figure 7. Evolutions comparées du débit de dose ambiant (en mRad/h ou nSv/h) simulées et observées (d'après SMSR, 1975, via deux graphes renumérisés) à Mahina et Taravao.

Bien que la comparaison entre un débit de dose absorbé (en rad/h) et un débit de dose efficace (Sv/h) ne soit pas rigoureuse, elle permet toutefois une vérification des ordres de grandeur et de l'allure de la dynamique simulée. Cette comparaison montre que le débit de dose modélisé demeure assez satisfaisant jusque début août. La décroissance prédite au-delà des deux ou trois premières semaines se fait trop rapidement – ce qui se voit en particulier au niveau du PSR de Taravao. Ceci est vraisemblablement dû à la non prise en compte du bruit de fond radioactif et de la contribution du retour des masses d'air contaminées du tir Centaure et/ou d'autres tirs atmosphériques après avoir fait le tour du globe (aux mêmes latitudes).

5.2. Doses efficaces

Les doses efficaces estimées pour la première année suivant les retombées radioactives, toutes voies d'exposition et tous radionucléides confondus, sont fournis dans le Tableau 2 et la Figure 8, par classe d'âge et par localité. Ces doses efficaces varient de 0,4 à 5,6 mSv, les doses les plus faibles étant celles reçues par les adultes et les doses les plus élevées celles reçues par les très jeunes enfants.

Pour toutes les classes d'âge, les doses efficaces les plus élevées sont estimées là où les dépôts radioactifs les plus importants ont été mesurés – Hitiaa et Teahupoo/plateau de Taravao. A l'inverse, les doses les plus faibles concernent les zones où les dépôts ont été les plus faibles – Papeete et Taravao.

Tableau 2. Dose efficace totale estimée pour la première année suivant les dépôts (mSv).

Station	Dose efficace à un an (mSv)					
	Bébé (0-1an)	Très jeune enfant (1-2ans)	Jeune enfant (2-7ans)	Enfant (7-12ans)	Adolescent (12-17ans)	Adulte (>17ans)
Hitiaa	4,5	5,6	4,3	3,5	2,8	2,7
Mahina	1,6	3,4	2,6	2,0	1,5	1,6
Papeete	1,0	1,5	1,1	0,8	0,6	0,6
Pueu	1,6	2,3	1,9	1,6	1,3	1,3
Taravao	0,9	1,0	0,7	0,5	0,4	0,4
Teahupoo	3,1	4,9	4,2	3,7	3,2	3,2

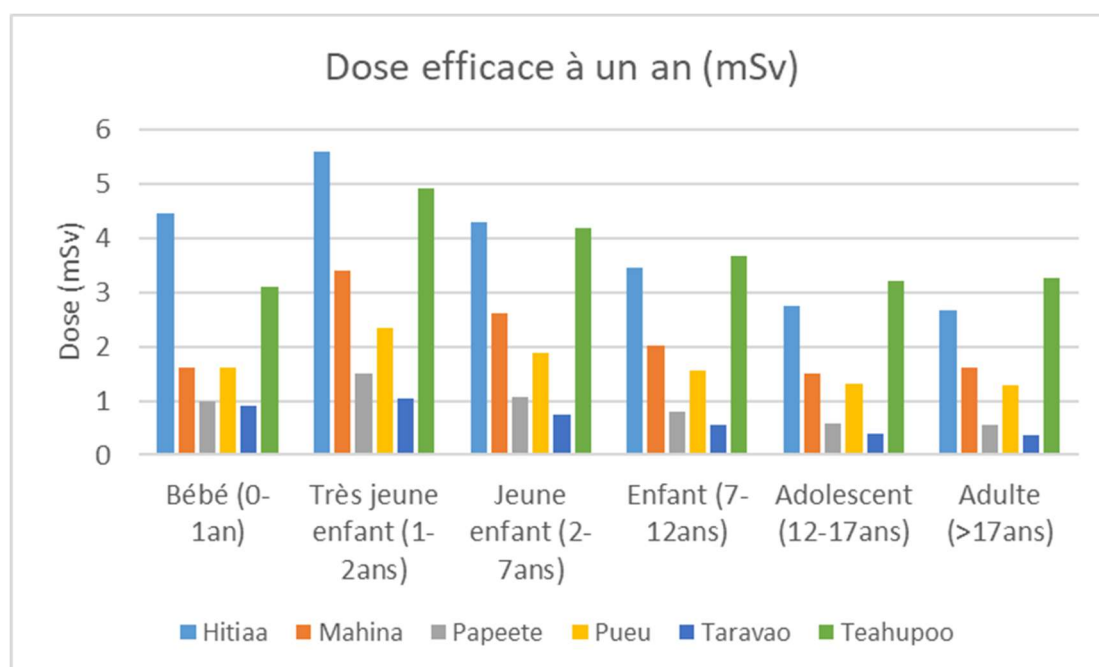


Figure 8. Dose efficace totale estimée pour la première année suivant les dépôts par classe d'âge et localité (mSv).

Les voies d'expositions prédominantes sont l'ingestion et l'exposition externe. La répartition entre ces deux voies d'exposition dépend fortement du lieu et de l'âge, comme illustré sur la Figure 9. L'ingestion de denrées

contaminées est la voie d'exposition largement prépondérante pour les très jeunes enfants, à l'exception de Teahupoo. Concernant les adultes, les contributions des voies externe et ingestion sont plus équilibrées, sauf à Papeete et Taravao où l'ingestion domine encore largement, et à Teahupoo où la voie externe est largement prépondérante. La contribution de l'exposition externe au dépôt augmente relativement à celle de l'ingestion à mesure que le dépôt augmente et, à dépôt équivalent, à mesure que la pluviométrie augmente. Ce dernier point est assez classique dans les études d'impact dosimétrique de retombées atmosphériques. En effet, si l'exposition externe augmente proportionnellement aux dépôts, ce n'est pas le cas de la contamination des plantes par voie foliaire (et donc de l'ensemble des denrées) qui, elle, augmente moins vite que les dépôts pluvieux en raison du phénomène de dégouttement de l'eau sur les feuilles qui entraîne une moindre rétention foliaire des radionucléides. En conséquence, la dose liée à l'ingestion de denrées n'augmente pas de manière proportionnelle aux dépôts pluvieux.

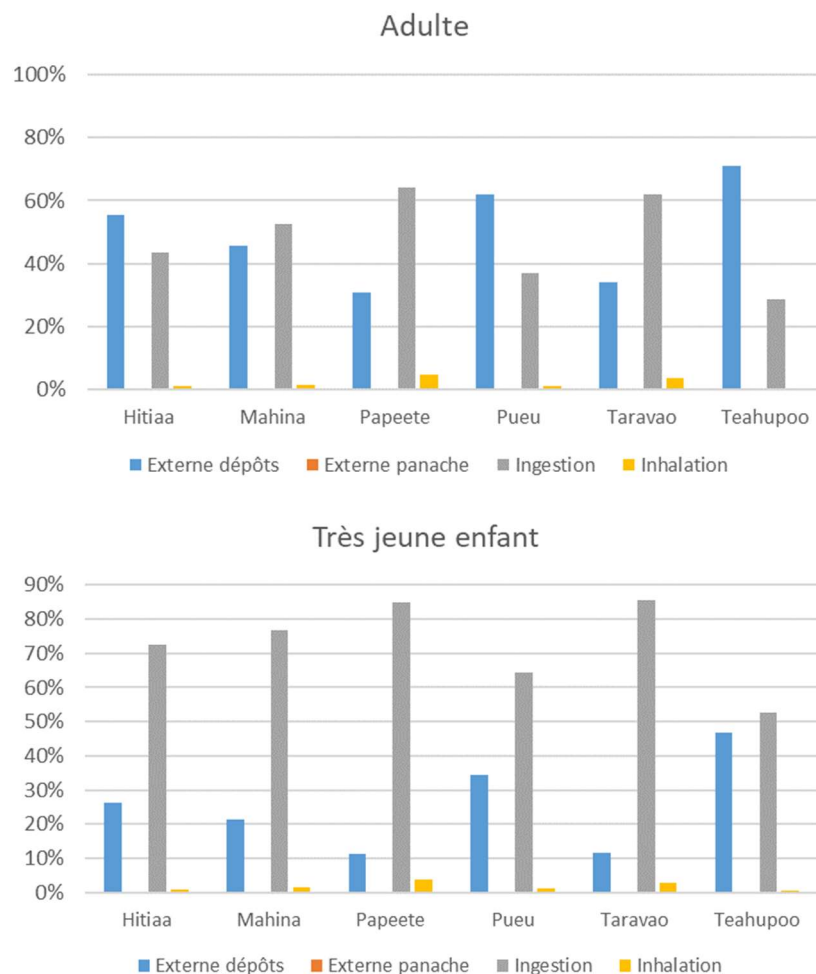


Figure 9. Contribution des voies d'atteinte à la dose efficace à un an, par localité, pour le très jeune enfant (1-2 ans) et pour l'adulte.

Dans tous les cas, la dose annuelle résultant de l'inhalation est très faible, voire négligeable, et ne représente que quelques pourcents seulement de la dose totale (elle est au plus de 7%) si l'on considère que tout l'iode présent dans l'air l'était sous forme particulaire. Supposer que l'iode particulaire ne représentait que le quart de l'iode présent dans l'air et que les trois-quarts étaient constitués d'iode gazeux moléculaire non mesuré, comme discuté au chapitre 4.3, augmenterait la dose efficace totale de 1 à 14% suivant la localité et la classe d'âge.

Le fait que la dose par inhalation contribue peu à la dose totale, loin derrière la dose reçue par ingestion, a déjà été constaté lors des retombées atmosphériques des accidents de Tchernobyl et de Fukushima.

De manière générale, la contribution des radionucléides à la dose efficace dépend essentiellement des contributions relatives des deux voies d'expositions prédominantes : l'ingestion de denrées et l'exposition externe. Lorsque l'ingestion est la voie prépondérante, comme c'est le cas pour la dose au très jeune enfant à Hitiaa, l'iode 131 est très nettement majoritaire, avec une contribution de près de 50% (cf. *Figure 10*). Lorsque la contribution de la dose externe est importante, ce qui est le cas pour la dose à l'adulte à Teahupoo, la dose totale est due à un ensemble plus large de radionucléides, tels que les suivants : iode 132, lanthane 140, iode 131, ruthénium 103, zirconium 95, niobium 95, tellure 132 (cf. *Figure 11*).

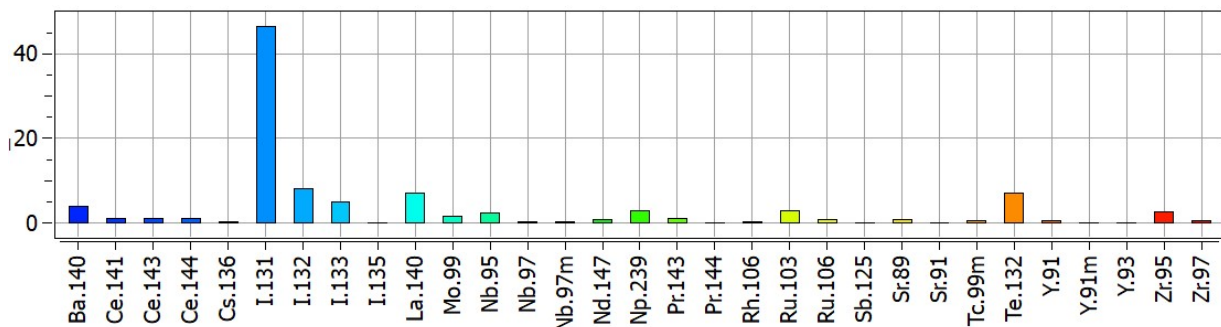


Figure 10. Contribution des radionucléides (en %) à la dose efficace totale reçue au bout d'un an par le très jeune enfant (1-2ans) à Hitiaa.

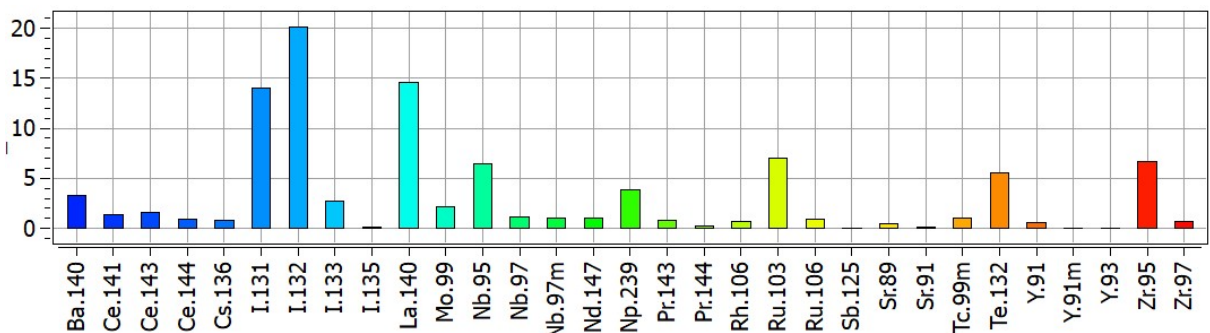


Figure 11. Contribution des radionucléides (en %) à la dose efficace totale reçue au bout d'un an par l'adulte à Teahupoo.

Cette tendance est confortée par l'analyse des contributions des radionucléides à la dose efficace reçue par l'ingestion seule d'une part, et par exposition externe seule d'autre part (cf. exemples dans l'annexe 5). Les doses efficaces par ingestion sont systématiquement et largement dominées par l'iode 131 quels que soient le lieu et la classe d'âge (contribution allant d'environ 40% à 85 %), les autres radionucléides pouvant approcher une contribution d'environ 10% étant le baryum 140 et le tellure 132. Au bout d'un an, les doses efficaces externes sont dominées par un certain nombre de radionucléides dont les contributions varient un peu en fonction du lieu : iode 132 et lanthane 140 en tête (entre 15 et 30%), niobium 95, ruthénium 103 et zirconium 95 (autour de 10%), suivi de neptunium 239 et iode 131 plus marginalement.

Pour la dose efficace par ingestion, la contribution des différents aliments dépend de la classe d'âge et du lieu (cf. exemples dans l'annexe 5). Pour les bébés dont l'alimentation ne repose que sur l'eau et le lait, ce dernier est de loin le contributeur principal (plus de 90 %). Pour les autres classes d'âge, les principaux contributeurs sont systématiquement les légumes, parfois de façon très nette (eg plus de 85% pour l'adulte à Mahina).

Viennent ensuite le lait de vache pour les enfants et plus rarement les adultes, ainsi que les poissons de lagon et les mollusques qui peuvent parfois représenter le second plus gros contributeur comme à Teahupoo (eg pour les adultes, 15% pour les mollusques et 16% pour les poissons). La faiblesse de la contribution des autres aliments, viandes, œufs et eau de boisson s'explique suivant les cas par la faiblesse des quantités consommées, ou par la faiblesse relative des niveaux atteints.

Enfin, la dynamique temporelle de la construction de la dose efficace, par voie d'atteinte, indique que, comme attendu (cf. chapitre 2), la dose est prise essentiellement le premier mois - tant pour la voie ingestion que pour l'exposition externe - comme l'illustre l'exemple pour le très jeune enfant à Hitiaa de la *Figure 12*. Cette dynamique est due à la fois aux processus de décroissance radioactive (la plupart des radionucléides déposés ayant une période radioactive courte) et de décroissance biologique dans les différentes composantes de la chaîne alimentaire (herbe, légumes, produits d'origine animale).

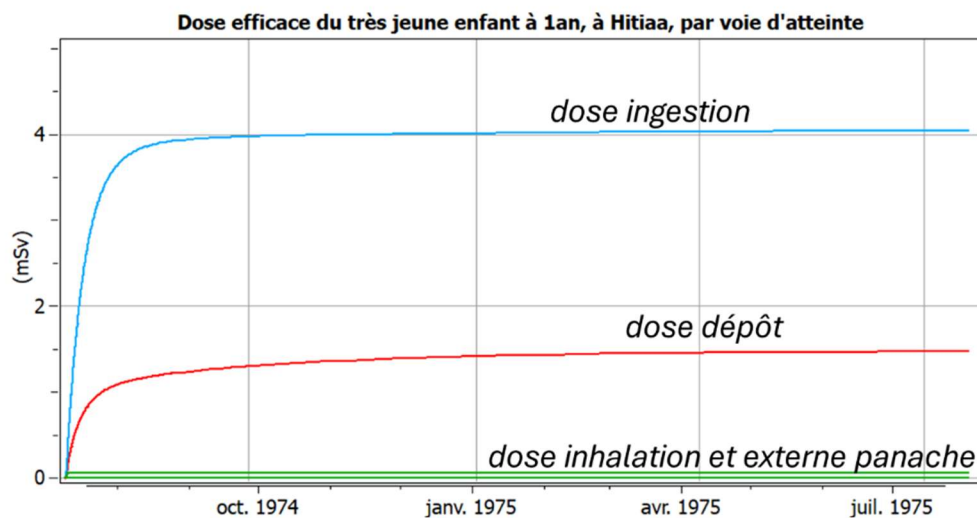


Figure 12. Cinétique d'engagement de la dose efficace du très jeune enfant (1-2 ans) à Hitiaa, par voie d'atteinte.

5.3. Doses équivalentes à la thyroïde

Les doses équivalentes à la thyroïde, toutes voies d'atteinte et tous radionucléides confondus, sont fournis dans le Tableau 3 et la *Figure 13*. Ces doses à la thyroïde varient de 3 à 59 mSv, les plus faibles étant celles estimées pour les adultes, les plus élevées étant celles estimées pour les enfants de 1 à 2 ans.

Pour toutes les classes d'âge, les doses à la thyroïde sont globalement plus fortes à Hitiaa, Mahina et Teahupoo/plateau de Taravao, avec des doses du même ordre pour ces deux dernières localités.

Quels que soient la classe d'âge et le lieu, la dose à la thyroïde est très majoritairement due à la voie ingestion comme illustré sur la *Figure 14*. Le fait de considérer que l'iode particulaire n'aurait représenté que le quart de l'iode total dans l'air (le complément étant constitué d'iode gazeux moléculaire), n'augmenterait la dose équivalente à la thyroïde que de 3 à 25% suivant la localité et la classe d'âge.

Tableau 3. Dose équivalente à la thyroïde estimée pour la première année suivant les dépôts (en mSv).

Station	Dose thyroïde à un an (mSv)					
	Bébé (0-1an)	Très jeune enfant (1-2ans)	Jeune enfant (2-7ans)	Enfant (7-12ans)	Adolescent (12-17ans)	Adulte (>17ans)
Hitiaa	56	59	42	27	18	14
Mahina	16	38	28	17	11	11
Papeete	15	21	15	9	6	5
Pueu	16	21	16	10	7	6
Taravao	15	15	10	6	4	3
Teahupoo	17	32	25	16	12	11

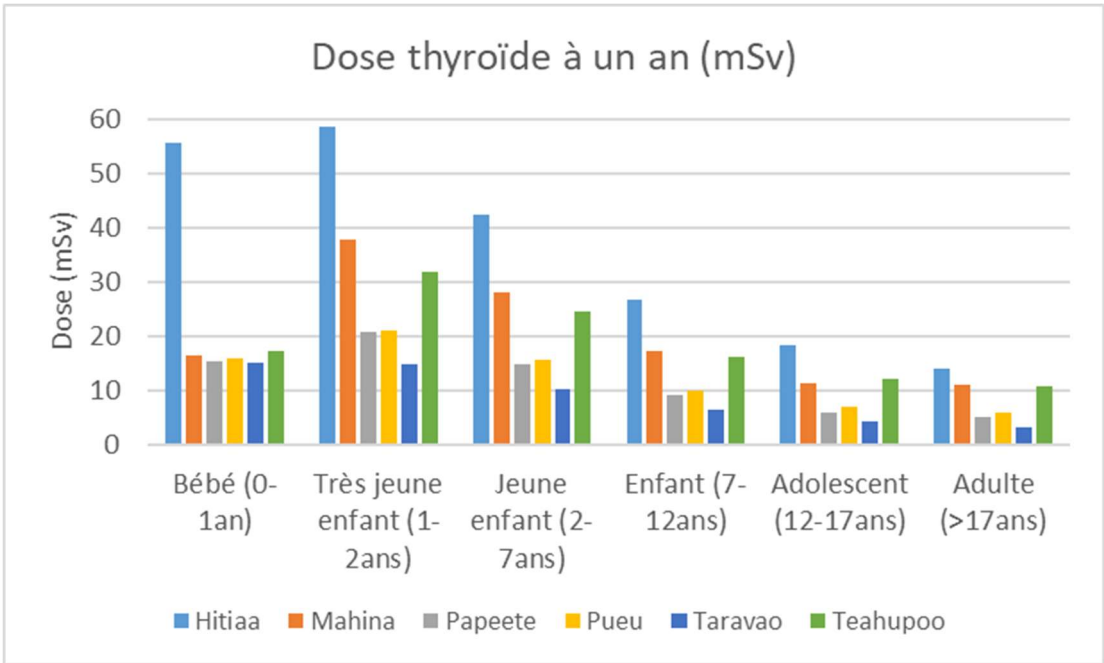


Figure 13. Dose équivalente à la thyroïde estimée pour l'année suivant les dépôts par classe d'âge et localité (mSv).

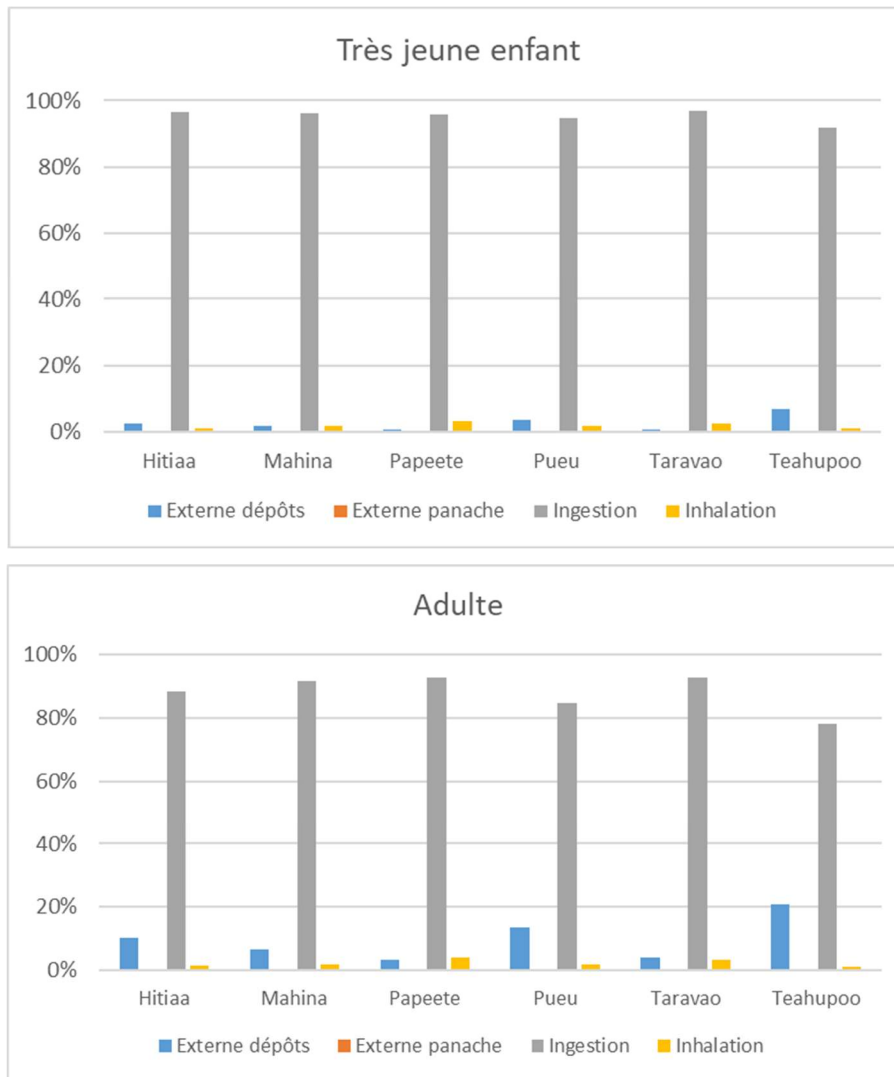


Figure 14. Contribution des voies d'atteinte à la dose équivalente à la thyroïde sur l'année suivant les dépôts, par localité, pour le très jeune enfant (1-2 ans) et pour l'adulte.

L'iode 131 est de loin le principal contributeur à la dose équivalente à la thyroïde, avec une contribution toujours supérieure à 80 %, (cf. exemples pour le très jeune enfant à Taravao et l'adulte à Teahupoo dans les Figure 15 et Figure 16 ci-dessous). Comme pour les doses efficaces, les lieux et classes d'âge pour lesquels on observe la plus faible contribution de l'iode 131 sont ceux où la part de la voie externe dans la dose totale à la thyroïde est plus forte, même si elle reste très limitée pour les doses équivalentes à la thyroïde.

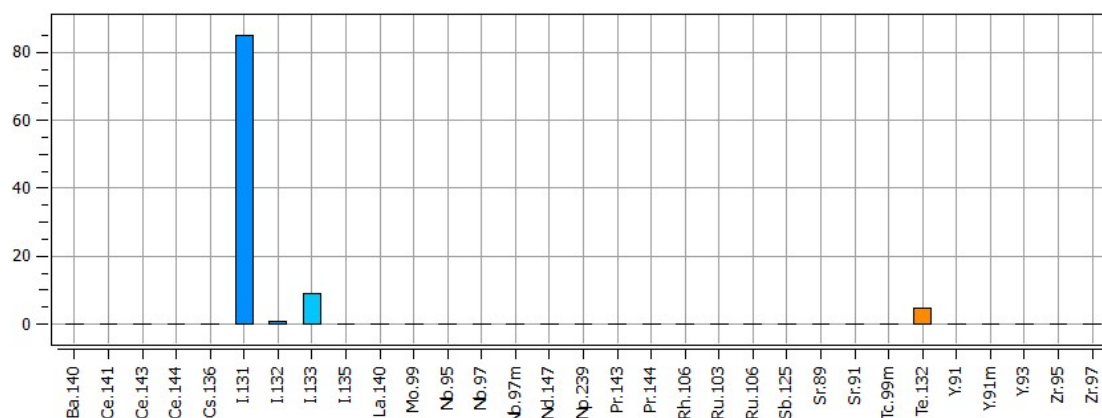


Figure 15. Contribution des radionucléides (en %) à la dose thyroïde totale reçue au bout d'un an par le très jeune enfant (1-2ans) à Taravao.

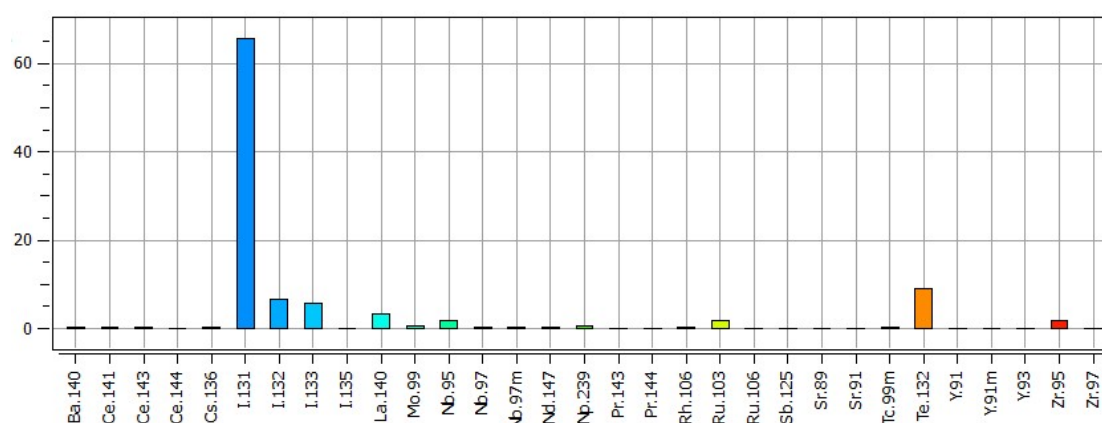


Figure 16. Contribution des radionucléides (en %) à la dose thyroïde totale reçue au bout d'un an par l'adulte à Teahupoo.

La contribution des différents aliments à la dose thyroïde dépend de la classe d'âge et du lieu (cf. exemples en annexe 5). Pour les bébés dont l'alimentation ne repose que sur l'eau et le lait, ce dernier est de loin le contributeur principal (plus de 90%). Pour les autres classes d'âge, les principaux contributeurs sont presque toujours les légumes, parfois de façon très nette (par exemple 85% pour l'adulte à Mahina). Le lait de vache est en général le second plus gros contributeur, bien qu'il puisse être le premier dans quelques cas : à Hitiaa pour toutes les classes d'âge à l'exception des adultes (dont la consommation de lait est moindre), en lien avec les activités élevées dans le lait local, ainsi qu'à Taravao pour les très jeunes enfants. Ponctuellement les produits de lagon contribuent plus que le lait, comme pour l'adolescent à Teahupoo (près de 40% pour l'ensemble des mollusques et poissons). De même que pour les doses efficaces, et pour des raisons identiques, la contribution des autres aliments - viandes, œufs et eau de boisson - reste très faible.

Enfin la dynamique temporelle de la construction de la dose thyroïde, par voie d'atteinte, est semblable à celle de la dose efficace, avec une dose prise pour l'essentiel le premier mois, comme l'illustre l'exemple pour le très jeune enfant à Hitiaa de la Figure 17. Cette dynamique est due à la fois aux processus de décroissance radioactive (la plupart des radionucléides déposés ayant une période de demi-vie courte) et de décroissance biologique dans les compartiments impliqués dans la chaîne alimentaire (herbe, légumes, produits d'origine animale).

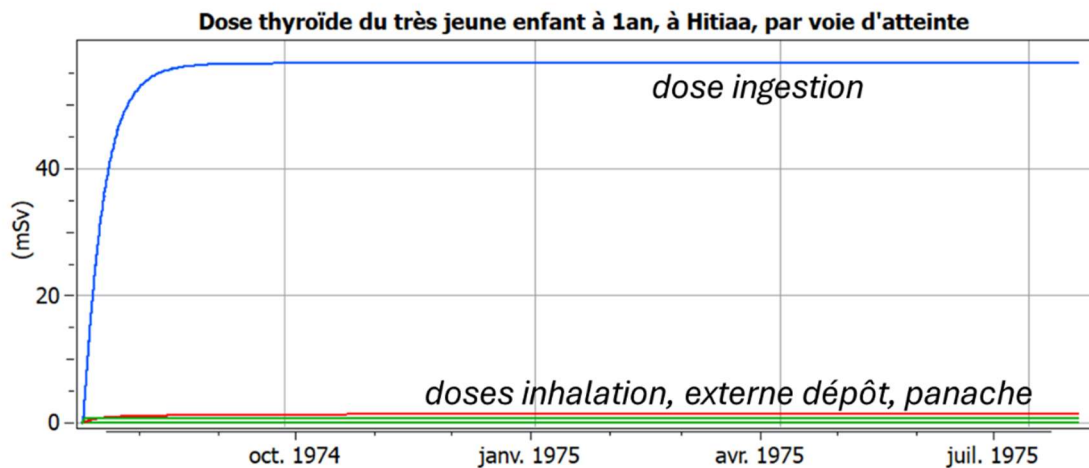


Figure 17. Cinétique d'engagement de la dose thyroïde du très jeune enfant (1-2ans) à Hitiaa, par voie d'atteinte.

6 CONCLUSION

Lors des retombées radioactives de l'essai Centaure, la population de Tahiti a tout d'abord été exposée au rayonnement émis par les gaz et particules radioactives en suspension dans l'air ainsi qu'à leur inhalation durant le passage des masses d'air contaminées puis, par la suite, par exposition externe aux dépôts radioactifs et ingestion de denrées alimentaires contaminées.

Bien que de nombreuses mesures radiologiques aient été effectuées à Tahiti lors des retombées de l'essai Centaure et dans les semaines qui ont suivi, elles ne permettent pas à elles seules d'estimer les doses reçues par la population ; elles doivent être précisées et complétées par des estimations supplémentaires obtenues par calcul. Aussi, pour estimer les doses à la population, l'ASNR a adopté une méthode qui repose sur l'utilisation combinée des résultats de mesures disponibles et d'un modèle dynamique de transferts des radionucléides dans l'environnement mis en œuvre dans sa plate-forme de modélisation SYMBIOSE. Les résultats de mesure disponibles ont été utilisés comme données d'entrée du modèle, pour en ajuster certains paramètres ou valider les estimations d'activité et de débit de dose ambiant dans l'environnement. Les évolutions dans le temps et dans l'espace des niveaux de contamination ainsi réestimées ont permis ensuite d'évaluer les doses efficaces et équivalentes à la thyroïde reçues par les personnes de tous âges résidant sur les six localités choisies comme étant représentatives de la variabilité spatiale des expositions.

De manière générale, la méthode et les valeurs des paramètres utilisés dans cette étude, notamment les hypothèses faites pour les scénarios d'exposition, visent à reconstituer des doses moyennes. Bien que certains choix majorants (ou minorants) aient pu être identifiés, l'objectif n'était pas d'estimer les doses les plus élevées susceptibles de résulter de scénarios particulièrement pénalisants qui ont pu se produire.

Les doses efficaces ainsi calculées pour les douze mois qui ont suivi les retombées radioactives de l'essai Centaure varient de 0,4 mSv pour des adolescents ou des adultes résidant à Taravao, à 5,6 mSv pour des enfants de 1 à 2 ans résidant à Hitiaa. De manière générale, les doses les plus faibles sont celles estimées pour les adultes et les doses les plus élevées sont celles estimées pour les très jeunes enfants. Pour toutes les classes d'âge, les doses efficaces les plus élevées sont estimées là où les dépôts radioactifs les plus importants ont été mesurés – Hitiaa et Teahupoo/plateau de Taravao. A l'inverse, les doses les plus faibles concernent les zones où les dépôts ont été les plus faibles – Papeete et Taravao. Les doses à la thyroïde varient entre 3 mSv et 59 mSv en suivant les mêmes logiques d'analyse liées aux classes d'âge et aux lieux de résidence. Les doses efficaces résultent principalement de l'ingestion de denrées et plus particulièrement de l'incorporation d'iode 131 via la consommation de légumes et de lait ainsi que de l'exposition externe aux dépôts d'un nombre restreint de

radionucléides (tellure-iode 132, baryum-lanthane 140, zirconium-niobium 95 et ruthénium 103). Les doses équivalentes à la thyroïde résultent essentiellement de l'incorporation d'iode 131 par ingestion de denrées (à plus de 80%) via la consommation de légumes et de lait de vache.

Ces résultats de calcul s'accompagnent d'incertitudes qui n'ont pas été évaluées précisément dans cette étude préliminaire. Ces incertitudes résultent tout d'abord des résultats de mesures radiologiques qui, malgré leur nombre, ne permettent pas toujours de caractériser ou valider de manière détaillée l'évolution des niveaux d'activité dans l'espace, dans le temps et pour l'ensemble des compartiments de l'environnement impliqués dans l'exposition des populations. On peut néanmoins noter que c'est pour les radionucléides et les denrées qui contribuent le plus aux doses par ingestion (notamment l'iode 131 dans les légumes et dans le lait de vache) que le nombre de données disponibles permet le meilleur ajustement du modèle. Une autre source d'incertitude non moins importante provient du manque d'information spécifique sur certains paramètres d'exposition tels que les rations alimentaires humaines et animales ou l'origine des denrées consommées sur chacune des localités considérées dans notre étude.

L'existence de ces incertitudes nous amène à considérer que seuls les ordres de grandeurs sont à retenir : les doses efficaces consécutives aux retombées de l'essai Centaure sur Tahiti estimées dans cette étude sont de l'ordre du millisievert, allant de moins de 1 millisievert à quelques millisieverts ; les doses équivalentes à la thyroïde estimées vont de quelques millisieverts à quelques dizaines de millisieverts. De même, concernant les écarts dans les doses estimées pour les six localités géographiques considérées, on retiendra que c'est probablement, et très logiquement, là où les dépôts ont été les plus importants que les doses ont pu être les plus élevées, en gardant à l'esprit que l'origine des denrées consommées a pu être à l'origine de singularités (par exemple la consommation de denrées produites sur une zone fortement touchée par les dépôts par des personnes résidant sur une localité beaucoup moins touchée, et inversement). A fortiori, cette étude qui fournit des estimations moyennes sur une population ne permet pas d'individualiser les calculs de doses.

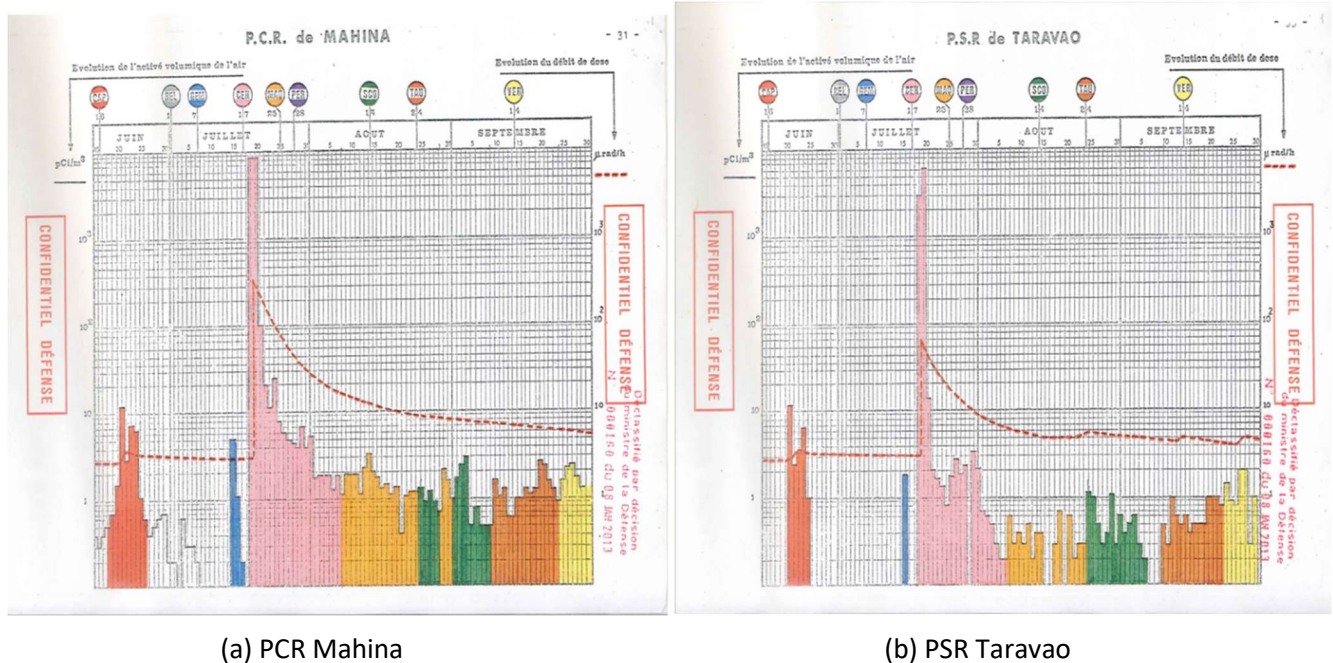
Enfin, il est important de noter que les doses calculées dans cette étude sont du même ordre de grandeur que celles calculées par le CEA (2006) et Philippe *et al* (2021,2022), étant entendu que ces études présentent, elles-aussi, des incertitudes importantes pour les raisons évoquées ci-dessus.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CEA (2006). Calcul de l'impact dosimétrique des retombées de l'essai CENTAURE à Tahiti, Dossier d'étude technique.
- Drozdovitch V. et al (2008). Reconstruction of individual radiation doses for a case-control study of thyroid cancer in French Polynesia. *Health Phys.* 94: 418–433.
- Drozdovitch V., de Vathaire F. & Bouville A. (2020a). Ground deposition of radionuclides in French Polynesia resulting from atmospheric nuclear weapons tests at Mururoa and Fangataufa atolls. *Journal of Environmental Radioactivity* 214: 106176.
- Drozdovitch V. et al. (2020b). Thyroid doses to French Polynesians resulting from atmospheric nuclear weapons tests: estimates from detailed population lifestyle data and radiation measurements. *Health Phys.* 118: 170–184.
- EPA/FG12 (1993). Federal Guidance Report No. 12: External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil. U.S. Environmental Protection Agency
- Hicks H.G. (1981). Results of Calculations of External Radiation Exposure Rates from Fallout and the Related Radionuclides Composition. Lawrence Livermore National Laboratory; LLNL Report UCRL-53152, Livermore, CA.
- ICRP (1990). International Commission on Radiological Protection: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection; ICRP publication n°60. 1990.
- ICRP (1994). International Commission on Radiological Protection: Human Respiratory Tract – Model for Radiological Protection; ICRP Publication n°66; Volume 24 N° 1-3. 1994
- ICRP (1996). International Commission on Radiological Protection: Age-dependent Dose to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients; ICRP Publication n°72; Volume 26 N° 1. 1996
- INSERM (2021). Essais nucléaires et santé, Conséquences en Polynésie française. Expertise collective.
- IRSN (2019). 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: 1-43
- JEFF (2005). Base de données JEFF - Joint Evaluation Fission and Fusion File - AEN - février 2005
- Ministère de la Défense (2006). « La dimension radiologique des essais nucléaires français en Polynésie : à l'épreuve des faits » (1-476).
- Philippe S., Schoenberger S. & Ahmed N. (2022). Radiation Exposures and Compensation of Victims of French Atmospheric Nuclear Tests in Polynesia. *Science & Global Security*, vol. 30, Issue 2, pages 62-94.
- Philippe S. & and Tomas Statius T. (2021). *Toxique : Enquête sur les essais nucléaires français en Polynésie* (Presses Universitaires de France, 2021): 167.
- Republic of France (1975). Monitoring of radioactivity in 1974. Information submitted by France to UNSCEAR. New York: United Nations; UNSCEAR Report A/AC. 82/G/L. 1521.
- SMCB (1975 a). Contrôle biologique en Polynésie 1974-1975 Tome I
- SMCB (1975 b). Contrôle biologique en Polynésie 1974-1975 Tome II
- SMSR (1974 a). Retombée consécutive au tir Centaure (complément au rapport de référence). Ref. 101/SMSR/PAC/CD.
- SMSR (1974 b). Retombées en Polynésie lors des 1^{ère} et 2^{ème} rafale de la campagne 1974. Rapport 3/SMSR/GOEN/SD.
- SMSR (1975). "Campagne 1974. Retombées en Polynésie". Rapport 11/SMSR/PEL/CD.

ANNEXE 1 : ACTIVITE VOLUMIQUE ET COMPOSITION ISOTOPIQUE DE L'AIR

Les mesures d'activité dans l'air effectuées sur Tahiti lors des retombées de l'essai Centaure proviennent de l'analyse de filtres d'appareil de prélèvement d'aérosols (filtre APA). Les mesures d'activité effectuées sur les filtres de type APA 100 (débit de 100 m³/h) au Poste de Contrôle Radiologique (PCR) de Mahina ont été effectuées à la fin du prélèvement. Les mesures sur filtres de type APA/MD au Poste de Surveillance Radiologique (PSR) de Taravao ont été effectuées en différé puis rapportées à la date de fin de prélèvement. Le rapport (SMSR, 1975) fournit ainsi des valeurs d'activité moyenne sur 24h consignées dans des tableaux ou représentées sous forme graphique. Les activités mesurées respectivement les 19 et 20 juillet à Mahina s'élèvent respectivement à 8320 pCi/m³ (308 Bq/m³) et 8680 pCi/m³ (321 Bq/m³), contre 3000 pCi/m³ (111 Bq/m³) et 6000 pCi/m³ (222 Bq/m³) à Taravao.



(a) PCR Mahina

(b) PSR Taravao

Figure 18 Evolutions temporelles de l'activité volumique de l'air (en pCi/m³) et du débit de dose ambiant (en mrad/h) enregistrées à Mahina et Taravao de juillet à septembre 1974. D'après SMSR (1975).

La composition isotopique des masses d'air à leur arrivée sur l'île le 19 juillet a été estimée par le CEA à l'aide de la base de données JEFF (CEA, 2006) à une date de référence égale à H+54 heures (soit 54 heures après le déclenchement du tir). La liste ainsi établie, présentée dans le *Tableau 4*, comporte 75 radionucléides principaux, 90% de l'activité β -globale étant portée par 25 contributeurs majoritaires dont des isotopes de l'iode et du tellure à hauteur de ~20% et des isotopes du xénon à hauteur de ~10%. Le spectre utilisé dans notre étude comprend 64 des 75 radionucléides identifiés par CEA, auxquels s'ajoutent 74 radionucléides produits par filiation mais dont l'abondance demeure néanmoins très faible au cours de la simulation. Si l'on en croit les estimations du CEA, les 11 radionucléides à vie courte qui ont été omis dans notre étude car non modélisés dans SYMBIOSE - ^{109m}Ag, ⁷⁷As, ¹¹⁵Cd, ¹⁵⁷Eu, ¹⁵⁹Gd, ^{115m}In, ⁹⁶Nb, ¹¹²Pd, ^{105m}Rh, ¹⁵⁶Sm et ¹⁶¹Tb - ne contribuent qu'à hauteur de 1,39% de l'activité totale à H+54 h. Nous avons supposé que les abondances relatives des radionucléides présents dans l'air le 19 juillet étaient dictées par les estimations du CEA à H+54 h. La composition isotopique des masses d'air modélisée les jours suivants tient compte du vieillissement sous l'effet des processus de décroissance/filiations radioactives.

Tableau 4. Liste et caractéristiques des principaux radionucléides présents dans le terme source, lesquels sont classés par contribution décroissante. D'après CEA (2006).

Isotope	Période (s)	Contribution (%)	
		avec gaz rares	sans gaz rares
²³⁹ Np	2.03E+05	12.24	13.49
¹⁰⁵ Rh	1.27E+05	7.58	8.36
¹³³ I	7.49E+04	6.96	7.68
⁹⁹ Mo	2.37E+05	6.43	7.09
^{99m} Tc	2.16E+04	6.21	6.85
¹⁴³ Ce	1.19E+05	5.26	5.80
¹³² I	8.26E+03	5.23	5.76
¹³² Te	2.77E+05	5.07	5.59
¹³³ Xe	4.53E+05	4.64	-
⁹⁷ Nb	4.33E+03	4.58	5.05
¹³⁵ Xe	3.29E+04	4.27	-
⁹⁷ Zr	6.03E+04	4.25	4.68
^{97m} Nb	5.27E+01	4.04	4.46
¹³¹ I	6.93E+05	2.01	2.22
¹⁴⁰ Ba	1.10E+06	1.92	2.11
¹⁴⁹ Pm	1.91E+05	1.52	1.67
¹⁴⁰ La	1.45E+05	1.25	1.37
^{131m} Te	1.08E+05	1.23	1.36
⁹³ Y	3.66E+04	1.21	1.33
¹⁴³ Pr	1.17E+06	1.04	1.15
¹⁵¹ Pm	1.02E+05	0.95	1.05
¹⁰³ Ru	3.39E+06	0.87	0.96
^{103m} Rh	3.37E+03	0.86	0.94
¹⁴⁷ Nd	9.49E+05	0.83	0.92
¹⁴¹ Ce	2.81E+06	0.78	0.86
⁹¹ Sr	3.47E+04	0.68	0.74
¹²⁷ Sb	3.33E+05	0.60	0.66
¹²⁷ Te	3.37E+04	0.54	0.59
¹⁵³ Sm	1.67E+05	0.53	0.59
^{109m} Ag	3.96E+01	0.44	0.49
¹⁰⁹ Pd	4.93E+04	0.44	0.49
³ H	3.89E+08	0.44	0.48
^{91m} Y	2.98E+03	0.43	0.48
¹³⁵ I	2.37E+04	0.39	0.43
⁹⁵ Zr	5.53E+06	0.37	0.41
¹¹² Ag	1.13E+04	0.35	0.39
^{133m} Xe	1.89E+05	0.33	-
¹¹² Pd	7.31E+04	0.30	0.33
¹¹¹ Ag	6.44E+05	0.27	0.30
¹³¹ Te	1.50E+03	0.26	0.29
^{115m} In	1.62E+04	0.23	0.25
¹²⁸ Sb	3.24E+04	0.23	0.25
⁹¹ Y	5.06E+06	0.22	0.24
¹¹⁵ Cd	1.92E+05	0.21	0.23

Isotope	Période (s)	Contribution (%)	
		avec gaz rares	sans gaz rares
¹²¹ Sn	9.74E+04	0.20	0.22
⁸⁹ Sr	4.37E+06	0.18	0.20
¹⁴⁵ Pr	2.15E+04	0.12	0.13
¹⁵⁷ Eu	5.46E+04	0.08	0.09
¹²⁵ Sn	8.33E+05	0.07	0.08
¹⁴⁴ Pr	1.04E+03	0.07	0.07
¹⁴⁴ Ce	2.46E+07	0.07	0.07
^{135m} Xe	9.17E+02	0.07	0.00
¹⁰⁶ Rh	3.00E+01	0.06	0.07
¹⁰⁶ Ru	3.22E+07	0.06	0.07
^{129m} Te	2.90E+06	0.06	0.07
¹⁵⁶ Eu	1.31E+06	0.05	0.06
¹³⁶ Cs	1.13E+06	0.05	0.05
¹²⁹ Te	4.18E+03	0.05	0.05
¹⁵⁶ Sm	3.38E+04	0.04	0.04
¹⁵⁰ Gd	6.65E+04	0.04	0.04
^{58m} Co	3.20E+04	0.03	0.04
¹⁰⁵ Ru	1.60E+04	0.03	0.04
⁵⁸ Co	6.12E+06	0.02	0.02
⁷⁷ As	1.40E+05	0.02	0.02
⁹⁵ Nb	3.02E+06	0.02	0.02
²⁴¹ Pu	4.52E+08	0.01	0.02
²⁴² Am	5.77E+04	0.01	0.02
¹⁴¹ La	1.41E+04	0.01	0.01
¹²⁸ Sb	1.07E+06	0.01	0.01
⁹² Y	1.27E+04	0.01	0.01
^{105m} Rh	4.00E+01	0.01	0.01
¹²⁹ Sb	1.57E+04	0.01	0.01
¹³⁰ I	4.45E+04	0.01	0.01
⁹⁶ Nb	8.41E+04	0.01	0.01
¹⁶¹ Tb	5.95E+05	0.01	0.01

Nous disposons par ailleurs d'une estimation moyenne de la composition des masses d'air déduite des observations acquises lors des essais nucléaires américains sur le site test du Nevada et ce pour des délais variés s'échelonnant de H+6 h à H+20 j (Hicks et al, 1981 ; Drozdovitch et al, 2020a). Notons que c'est précisément cette estimation qui a été utilisée par Drozdovitch et al. (2020b) pour évaluer l'impact cumulé à la thyroïde des tirs atmosphériques réalisés par la France entre 1966 et 1974 sur les populations de Polynésie française. Bien que le spectre de radionucléide renseigné y soit plus restreint (e.g. absence d'isotopes du rubidium, prométhium et xénon), il nous a paru intéressant de comparer ces dernières estimations avec celles du CEA, moyennant le fait de recalculer (par interpolation temporelle) les contributions relatives (%) à la même date H+54 h et de se

restreindre aux radionucléides communs. Ces deux estimations s'avèrent en fait assez cohérentes dans l'ensemble et ne diffèrent significativement que pour ^{239}Np (différence relative de près d'un facteur 2).

Nous disposons enfin de deux mesures de l'activité globale de l'air et de l'activité de quelques radionucléides dans des aérosols collectés le 19 juillet sur filtres APA au niveau du PCR de Mahina. Les activités mesurées sur filtre ne concernent que la fraction particulaire de la radioactivité dans l'air. C'est probablement le cas des activités d'iode 131 mesurées sur ces filtres qui ne rendraient donc pas compte de la fraction gazeuse de ce radionucléide. Le CEA ne mentionne rien sur ce sujet.

Afin de vérifier la cohérence entre ces différentes sources d'information, nous pouvons comparer les contributions respectives de chacun des radionucléides par rapport à celle de l'iode 131 (cf. *Tableau 5*). Le ratio isotopique a l'avantage, contrairement à la contribution relative (%), de ne pas dépendre du spectre de radionucléides considéré ou mesuré. Cette analyse montre que, dans l'ensemble, les estimations théoriques sont cohérentes avec les données acquises sur les filtres APA pour les 17 radionucléides investigués, à l'exception du césium 136 pour lequel le ratio $^{136}\text{Cs}/^{131}\text{I}$ semble sous-estimé d'un facteur 2 et de l'iode 133 pour lequel le ratio $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$ semble surestimé d'un facteur proche de 3. Cette analyse conforte donc le choix fait dans cette étude de considérer que l'iode 131 était porté uniquement (ou très majoritairement) par la fraction particulaire.

Tableau 5. Comparaison entre les ratios isotopiques prédits et mesurés (rapport entre la contribution d'un radionucléide et celle de l'iode 131).

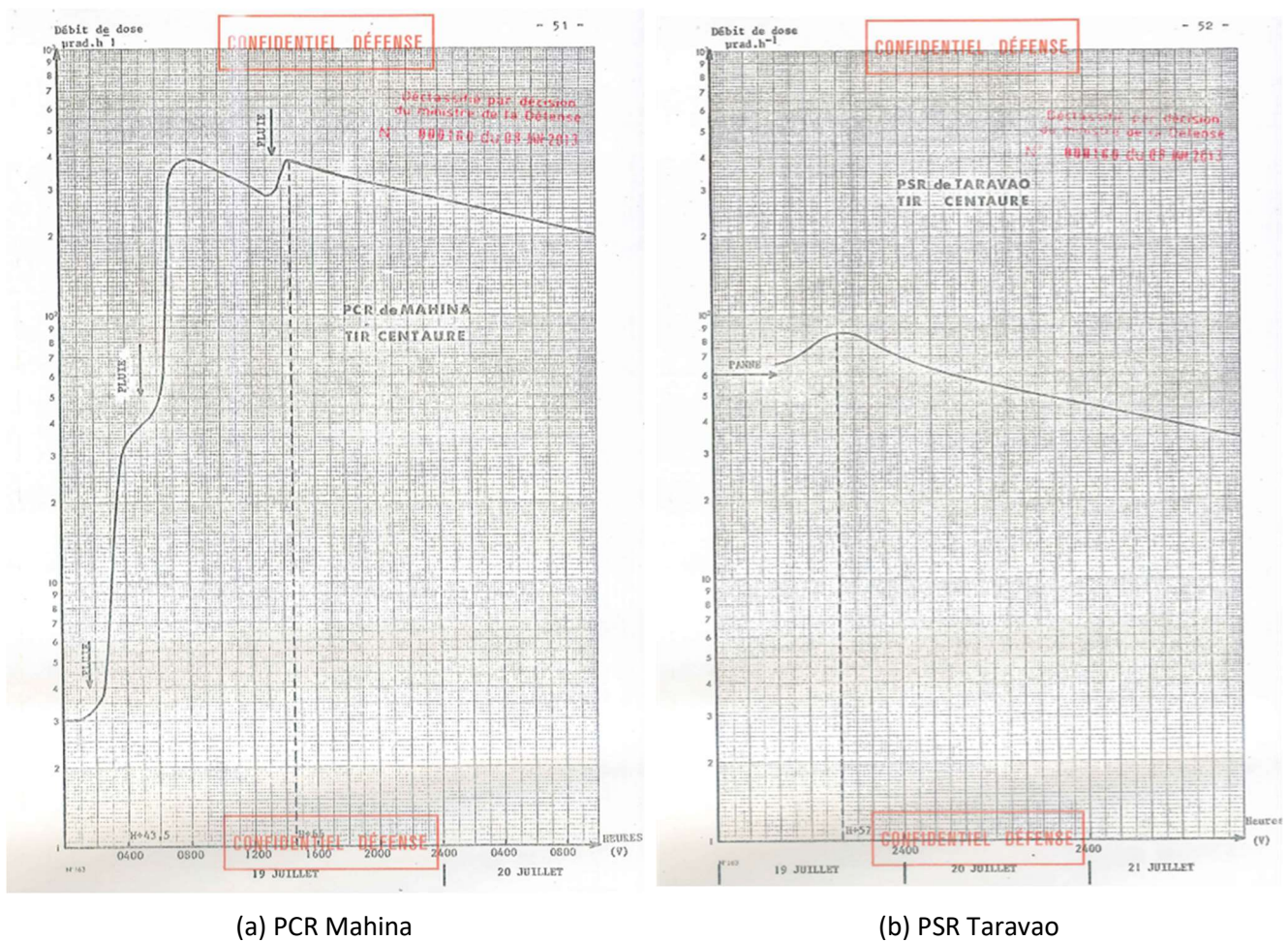
	Ce141	Ce143	Cs136	I131	Te132 (→I132)	I132	I133	Ba140 (→La140)	La140	Mo99 (→Tc99m)	Tc99m	Np239	Ru103	Zr95 (→Nb95)	Nb95	Zr97 (→Nb97)	Nb97
Théorique (CEA, 2006)	0.387	2.613	0.023	1.00	2.52	2.59	3.46	0.95	0.62	3.19	3.09	6.08	0.43	0.18	0.01	2.11	2.27
Théorique (Hicks, 1981)	0.347	2.109	0.010	1.00	2.16	2.20	2.76	0.88	0.56	2.23	2.13	10.51	0.27	0.17	0.01	1.47	1.47
Ratio moyen	0.367	2.361	0.016	1.00	2.34	2.40	3.11	0.92	0.59	2.71	2.61	8.29	0.35	0.18	0.01	1.79	1.87
Filtre CEA (APA 240)		1.846	0.031	1.00	1.62	1.69	1.15	0.77	0.54	2.77	3.00	6.38	0.31	0.23	0.01	1.77	1.92
Filtre CEA (APA 610)	0.297	2.459	0.044	1.00	1.62	1.68	1.16	1.00	0.65	3.51	3.84	7.51	0.30	0.22	0.01	1.46	1.57
Ratio moyen	0.297	2.153	0.037	1.00	1.62	1.68	1.16	0.88	0.59	3.14	3.42	6.95	0.30	0.22	0.01	1.61	1.75

En rouge : ratio isotopique mesuré significativement différent du ratio théorique (différence relative > 50%)

ANNEXE 2 : DEBITS DE DOSE ET ACTIVITES DEPOSEES

Les débits de dose ambiants ont été mesurés à Tahiti au niveau des PCR de Mahina et PSR de Taravao.

Les enregistrements au PCR de Mahina signalent une brusque augmentation du débit de dose vers 2h30 le 19 juillet. Le maximum de $390 \mu\text{rad}\cdot\text{h}^{-1}$ est atteint à 14h30. Les augmentations du débit de dose sont clairement liées aux 3 épisodes de pluie du 19 juillet, qui ont entraîné des dépôts au sol. De son côté, le PSR de Taravao, du fait d'un dispositif en panne, ne fournit des mesures qu'à partir de 12h environ, le maximum de $85 \mu\text{rad}/\text{h}$ étant atteint vers 16h le 19 juillet. Les évolutions du débit de dose enregistrées par le SMSR à Mahina et Taravao durant le passage du nuage et à plus long terme sont reproduites dans la Figure 18 et la Figure 19.



(a) PCR Mahina

(b) PSR Taravao

Figure 19. Evolutions temporelles du débit de dose ambiant (en mrad/h) enregistrées à Mahina et Taravao du 19 au 21 juillet 1974. D'après SMSR (1975).

Les connaissances acquises sur les dépôts proviennent principalement de mesures de dépôt au sol effectuées au PCR de Mahina ainsi que de mesures d'activité surfacique effectuées sur le pourtour de l'île principale et la presqu'île de Taiarapu après le passage des masses d'air contaminées.

Les valeurs journalières chiffrées issues d'un autre document (SMSR, 1975) sont reportées dans le Tableau 6.

Tableau 6. Dépôts ajoutés mesurés du 19 au 24 juillet 1974 au PCR de Mahina (d'après SMSR, 1975).

Date	Dépôt ajouté mesuré (nCi/m ²)	Dépôt ajouté mesuré (MBq/m ²)
19 juillet	66 500	2,46
20 juillet	24 400	0,90
21 juillet	2 270	0,08
22 juillet	630	0,02
23 juillet	140	0,005
24 juillet	4 270	0,16

La cartographie des activités surfaciques établie par le SMSR est reproduite dans la *Figure 20*, dans laquelle les valeurs sont exprimées relativement à l'activité mesurée à Mahina. Ces activités surfaciques relatives ont été obtenues par la mesure de l'ambiance gamma à l'aide d'un scintillateur portatif de prospection (SPP3), les mesures ayant été faites le même jour sur l'île, a priori le 31 juillet ou au mois d'août. D'après SMSR (1974 a) : *"Cette ambiance était relevée au niveau des routes ou chemins. Les valeurs relevées étaient sensiblement indépendantes du revêtement. En s'écartant côté montagne des voies de communication (herbes ou sous-bois) l'on pouvait généralement noter une légère augmentation de la radioactivité (de l'ordre de 30%)"*.

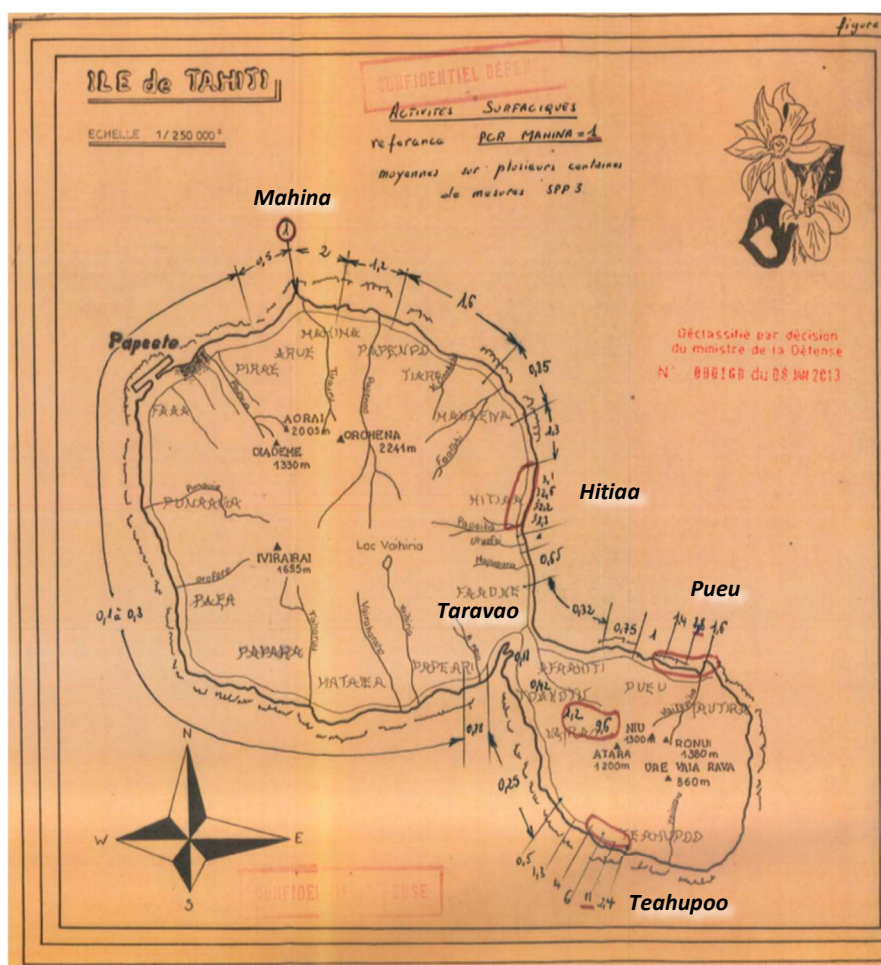


Figure 20. Cartographie des activités surfaciques (en valeurs relatives par rapport à l'activité mesurée à Mahina) établie par le SMSR par mesures de l'ambiance gamma le long des routes et des chemins. D'après SMSR (1974 a).

Les mesures sont localisées sur la zone côtière et sur la route menant de Taravao au plateau de Taravao. Cette carte fait apparaître des zones de dépôts plus importants en certains points de l'île qu'à Mahina : jusqu'à trois fois plus importants à l'Est de l'île principale (Hitiaa) et au Nord de la presqu'île de Tairapu (entre Pueu et Tautira) et jusqu'à 10 fois plus importants en certains endroits de la presqu'île (sommet surplombant le plateau de Taravao et Teahupoo). A l'inverse, les dépôts ont été plus faibles sur la côte Ouest et au Sud de l'île principale, en particulier à Papeete, et sur l'isthme de Taravao (entre le dixième et le tiers des dépôts observés sur Mahina).

Il est à noter que ces activités surfaciques se caractérisent par une forte variabilité spatiale à petite échelle. Les données brutes qui nous donneraient accès à une représentation plus fine de leur répartition spatiale ne nous sont pas connues (bien que la carte indique qu'elle exploite des centaines de mesures SPP3). Au niveau des zones de plus fort dépôt, le document (SMSR, 1974b) précise que les valeurs fortes sont très localisées et ne concernent tout au plus que quelques hectares. Cette variabilité spatiale résulte en partie de l'hétérogénéité des précipitations durant le passage des masses d'air et d'une orographie complexe. Nous noterons que la faiblesse relative des dépôts à l'Ouest et au Sud de l'île principale n'est peut-être pas sans rapport avec le fait que ces régions sont généralement moins arrosées. Il faut enfin rappeler que les mesures présentées ici ont été effectuées assez tardivement (fin juillet ou août), de sorte que la carte ne représente peut-être pas le dépôt initial mais un dépôt qui a déjà vieilli et possiblement évolué sous l'effet d'épisodes pluvieux et donc de phénomènes de ruissellement survenus dans les jours et semaines qui ont suivi les retombées.

ANNEXE 3 : ACTIVITES MASSIQUES DANS LES EAUX DE BOISSON ET LES DENREES

Les données disponibles

Dans les jours et les mois qui ont suivi le passage des masses d'air contaminées sur l'île de Tahiti, le SMCB a procédé à des mesures de l'activité globale et des activités de quelques radionucléides dans l'eau de boisson et dans quelques denrées alimentaires locales prélevées ou collectées au marché et en laiterie. Les données sur lesquelles s'appuie notre évaluation sont toutes documentées dans les rapports de surveillance radiologique du SMCB (1975a,b) ou le rapport d'évaluation d'impact du CEA (2006).

Le jeu de données est constitué de deux lots distincts : d'une part, des moyennes mensuelles de mesures d'activité de janvier 1974 à mai 1975 (SMCB, 1975a,b) et d'autre part, des mesures journalières acquises de juillet à septembre 1974 (CEA, 2006). En règle générale, ces mesures ne couvrent que de manière très irrégulière les périodes concernées (cf. exemple *Figure 21*), cela rendant plus incertaine notre compréhension de la dynamique temporelle des niveaux de contamination à court et moyen termes dans les denrées alimentaires. Une autre difficulté réside dans le fait que nous ne disposons pas des mesures individuelles ayant conduit au calcul des moyennes mensuelles (i.e. valeurs, dates et nature des prélèvements), lesquelles nous auraient permis de lever certains doutes sur les valeurs rapportées et analyser la cohérence avec le lot de valeurs journalières. Ces valeurs mensuelles sont, quoi qu'il en soit, assez difficiles à exploiter à des fins d'évaluation dosimétrique, du fait notamment de la présence de produits de fission à vie courte (e.g. ^{141}Ce , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{99}Mo , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, radio-iodes) dont la dynamique ne peut être appréhendée qu'au travers d'un échantillonnage journalier à hebdomadaire. Nous notons d'ailleurs, si tant est que notre compréhension est correcte, que l'évaluation dosimétrique du CEA ne s'appuie pas sur ces données mensuelles.

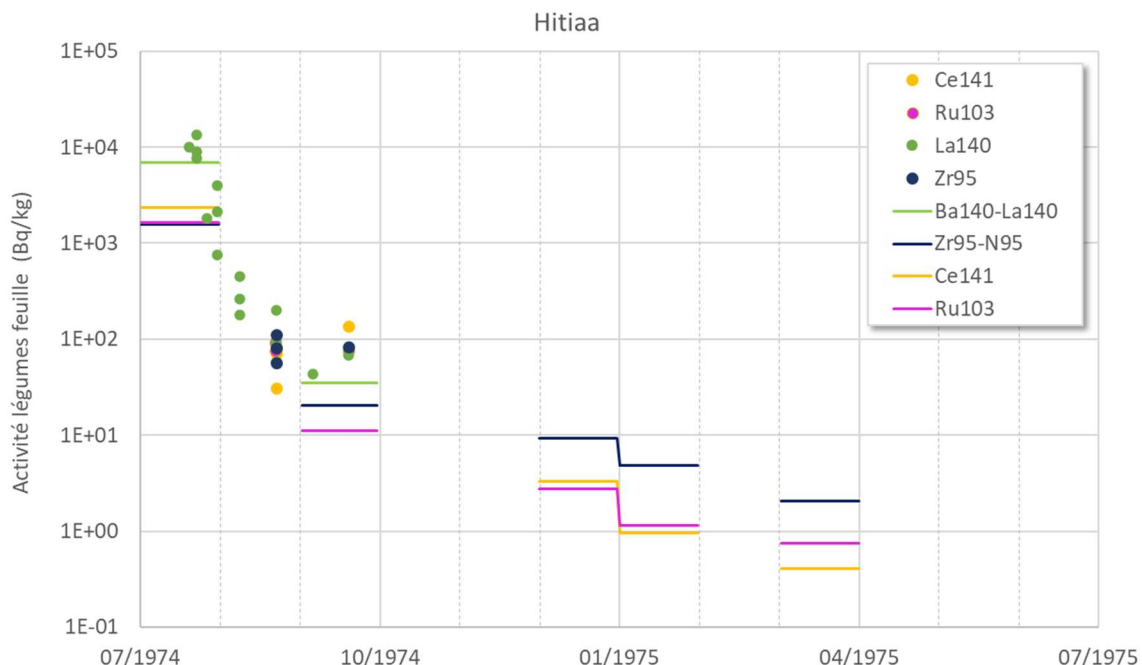


Figure 21. Evolution dans le temps de l'activité mesurée pour quelques produits de fission à vie courte dans les légumes feuille collectés à Hitiaa de juillet 1974 à juin 1975 (données journalières sous forme de points et mensuelles sous forme de traits). L'absence de traits reflète l'absence de données en moyenne mensuelle.

Les principales denrées d'origine terrestre objets des mesures journalières sont : les légumes-feuilles (e.g. salade, choux chinois, fafa, poireau), le lait de vache, les œufs et la viande de nature souvent indéterminée (bœuf, porc ou poulet ?). Il existe également des données éparées sur d'autres types de légumes et fruits exotiques produits localement (racine et tubercule, eau et pulpe de coco, coprah, fruit de plante arborescente et plante herbacée) qui n'ont pas été considérées dans notre étude. Bien que beaucoup moins fournies, nous disposons également de quelques mesures journalières d'activité dans des poissons, mollusques et crustacés de lagon (espèces variées de poisson, bénitier, plus rarement langouste) ainsi que dans des crustacés d'eau douce (chevrette) collectés au marché de Papeete ou Taravao. Comme les denrées aquatiques ont été peu ciblées par les mesures à caractère journalier, il nous a paru opportun de consolider nos évaluations en incluant dans notre jeu de données les moyennes mensuelles rapportées pour les poissons (espèces indéterminées) et mollusques de lagon (bénitier). Nous disposons enfin de mesures journalières d'activité globale dans l'eau de boisson, ainsi que des mesures d'activité ventilées par radionucléides sur la commune d'Hitiaa (CEA, 2006).

Les campagnes de prélèvement se sont concentrées sur 7 localités, cinq d'entre elles se situant sur l'île principale de Tahiti (Papeete, Pirae, Mahina, Hitiaa, Paea), les deux dernières se situant sur la presqu'île de Taïarapu (Taravao et Teahupoo). Comme indiqué Figure 22, tous les types de denrées n'ont pas été systématiquement échantillonnés sur chacune d'elle. On notera d'autre part que le lait échantillonné à Taravao provient en fait d'élevages situés sur le plateau de Taravao qui, comme nous l'avons vu précédemment (cf. paragraphe 4.6 et annexe 2) a été particulièrement touché du fait des précipitations.

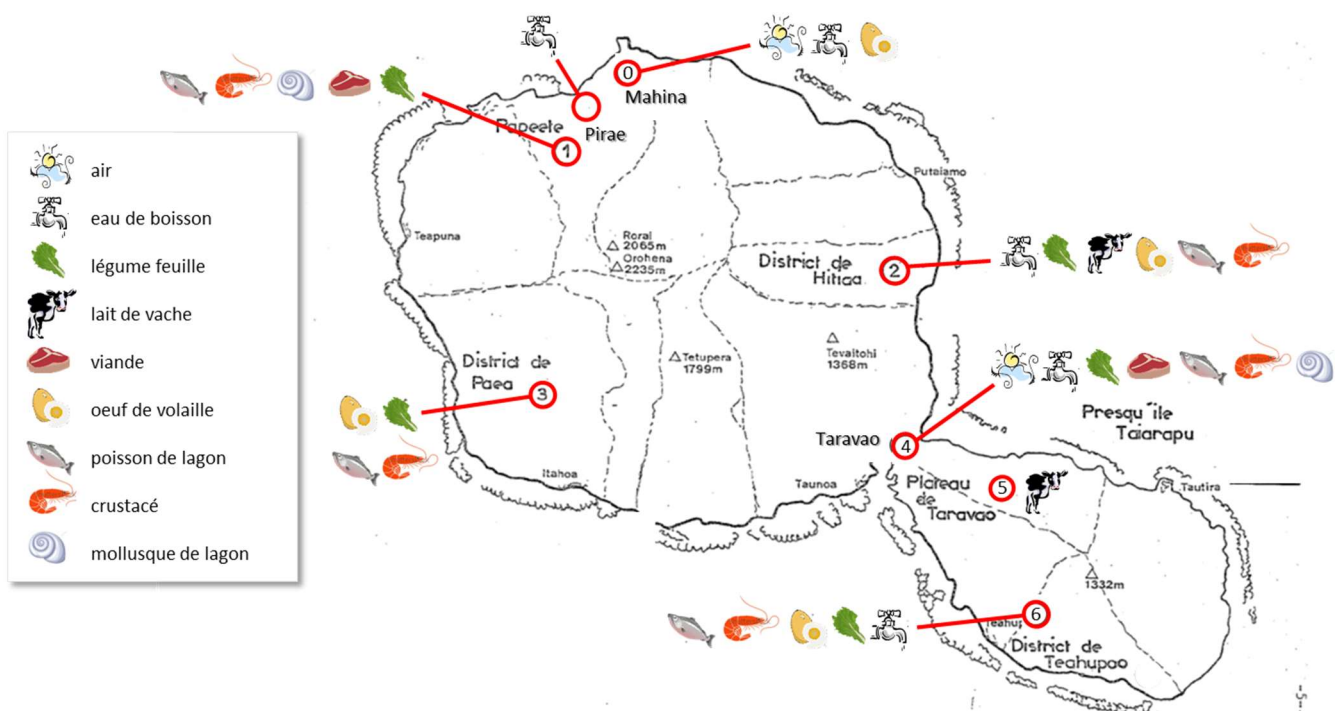


Figure 22. Cartographie des mesures d'activité réalisées dans l'air, l'eau de boisson et les denrées consommées dans les mois qui ont suivis les retombées.

L'analyse des mesures journalières d'activité dans l'eau de boisson à Hitiaa permet de vérifier si sa composition isotopique est conforme à celle de l'air. Pour ce faire, nous pouvons comparer les chroniques d'activité mesurées et prédites dans l'eau d'après l'activité globale mesurée à l'aide de la composition modélisée dans l'air. C'est ce qui est fait Figure 23. Nous constatons que les activités prédites sont globalement satisfaisantes, en particulier pour les iodes 131 et 132, bien que ponctuellement pessimistes, en particulier pour le couple baryum-lanthane 140. Ces résultats suggèrent que nous pouvons raisonnablement modéliser la dynamique de contamination dans

les eaux de boisson à partir des chroniques d'activité globale mesurées sur chacune des localités en se calquant sur la composition de l'air. Nous ferons l'hypothèse que l'eau de boisson consommée à Papeete présente un niveau de contamination identique à celui de Pirae (commune limitrophe).

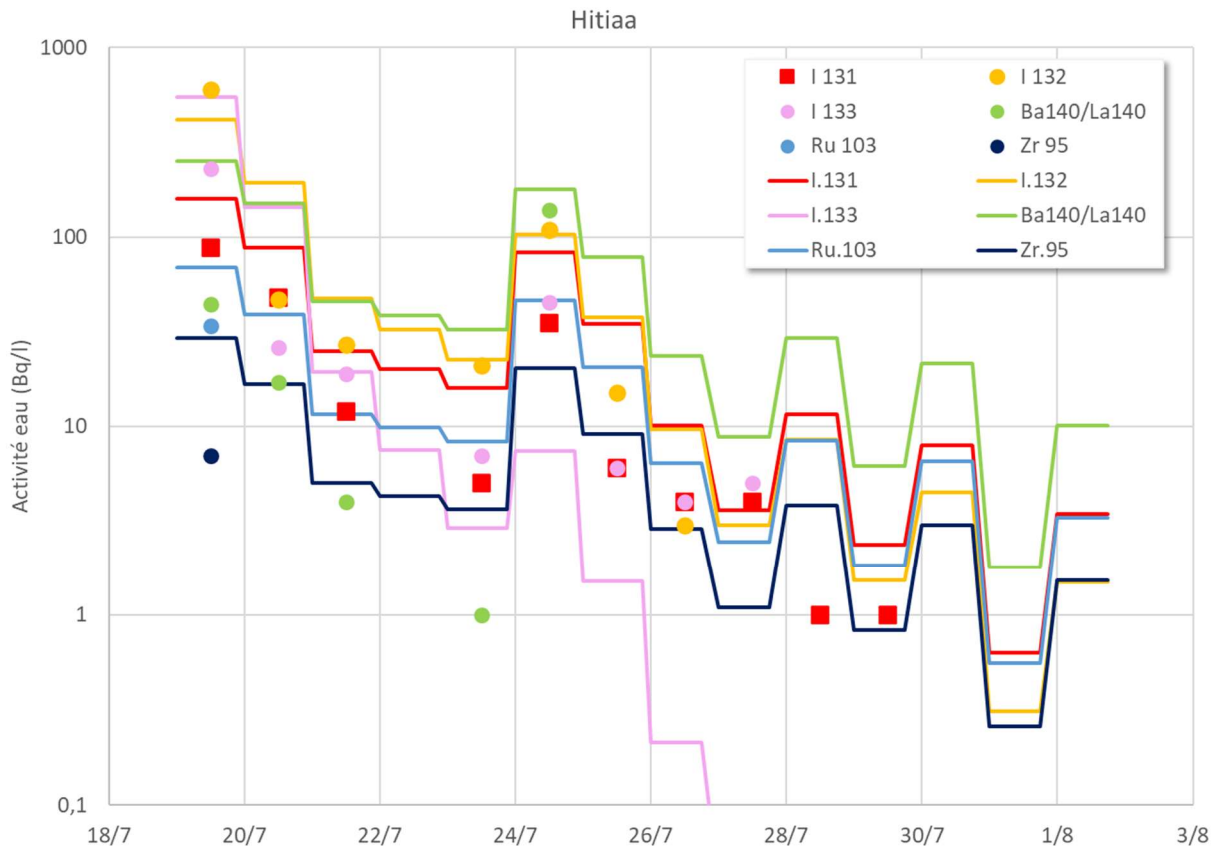


Figure 23. Evolutions comparées de l'activité dans l'eau de boisson (en Bq/l) mesurée (points) et estimée (lignes) à Hitiaa d'après la chronique d'activité globale dans l'eau et la composition isotopique de l'air.

Modélisation des chroniques d'activités massiques dans les denrées

L'évolution dans le temps et dans l'espace des activités massiques dans les denrées a été modélisée au moyen de la plate-forme SYMBIOSE. En l'absence de connaissances précises sur le transfert de radioactivité aux produits exotiques (e.g. eau de coco, coprah, autres fruits ou cultures exotiques), l'éventail des denrées considéré dans cette étude est conforme à celui qui se pratique en règle générale pour des études d'impact en métropole : herbe de pâture (affouragement des vaches), légume feuille (espèces indifférenciées), légume fruit (espèces indifférenciées), légume racine (espèces indifférenciées), céréales (espèces indifférenciées), lait de vache, œuf de poule et viandes de bœuf, poulet et porc. Les cultures fruitières n'ont pas été considérées dans notre étude. Le paramétrage du modèle n'a pas été modifié (i.e. utilisation des valeurs génériques des paramètres du modèle) à deux exceptions près : la biomasse végétale de l'herbe et les rations alimentaire des porcs et des poulets dont les valeurs ont été ajustées. L'abreuvement des animaux d'élevage a été pris en compte en considérant que la contamination de l'eau était celle mesurée dans les eaux de boisson.

Il est intéressant de comparer les chroniques d'activités massiques des radionucléides dans les denrées agricoles reconstituées par calcul, aux mesures journalières acquises de juillet à septembre 1974 dans les légumes feuille, le lait de vache, les œufs de poule et la viande. Les radionucléides concernés sont pour l'essentiel : ^{136}Cs (demi-vie de $\sim 13\text{ j}$), ^{131}I ($\sim 8\text{ j}$), ^{132}I ($\sim 2\text{ h}$), ^{133}I ($\sim 21\text{ h}$), ^{140}La ($\sim 1,7\text{ j}$), ^{103}Ru ($\sim 39\text{ j}$) et ^{95}Zr ($\sim 64\text{ j}$). Au-delà de cette période

ne subsistent que les isotopes dont la demi-vie est supérieure à 2 ou 3 mois et qui ne contribuent plus que faiblement à la contamination des végétaux (voie racinaire prédominante) et des denrées d'origine animale.

Les décroissances dans l'herbe (résultats non présentés), les légumes feuilles et le lait de vache sont majoritairement dictées par les processus de décroissance/filiations radioactives, pluviollessivage, dilution biologique (végétaux) et processus de métabolisation (lait de vache). Les pics de contamination sont atteints dès le 20 juillet dans les végétaux et de 1 à 8 jours après le dépôt dans le lait, ce dernier délai dépendant de la vitesse de métabolisation du radionucléide considéré. Nous constatons que la dynamique modélisée dans ces denrées est, en règle générale, assez satisfaisante (écart d'un facteur 2 à 3 avec les activités massiques mesurées) à l'exception du lait de vache collecté sur le plateau de Taravao pour lequel les activités en ^{131}I et ^{132}I (notamment) sont clairement surestimées. Une explication plausible est que le dépôt retenu dans notre scénario de régionalisation (*Figure 6* paragraphe 4.6) n'est probablement pas représentatif de l'activité qui s'est réellement déposée sur les pâturages destinés à la production laitière. En effet, ces pâturages pourraient tout aussi bien se situer dans une zone de plus basse altitude donc de plus faible dépôt que supposé. Les incertitudes sont importantes dans cette région car les dépôts y sont particulièrement hétérogènes et semblent positivement corrélés à l'altitude. Cette hypothèse pourrait être confortée par le fait que les prévisions d'activité dans le lait à Taravao, où le dépôt imposé est beaucoup plus faible, sont en meilleur accord avec les observations (cf. *Figure 4*).

Dans le cas des œufs et de la viande, il est beaucoup plus compliqué de vérifier la pertinence des activités massiques calculées parce que les données à échelles journalières sont encore moins nombreuses et que la nature et le lieu de production de la viande échantillonnée au marché de Papeete sont indéterminés. Comme nous ne disposons d'aucune information spécifique sur la composition du bol alimentaire fourni aux volailles et aux porcs, nous avons été contraints de simplifier leurs rations alimentaires quotidiennes en ne considérant que 3 types d'aliments (i.e. eau, herbe et céréale) puis d'ajuster les contributions de l'herbe et des céréales. Ce faisant, les niveaux d'activité modélisés et les dynamiques prédites dans les œufs semblent cohérentes ou, a minima, non contredites par la mesure. S'agissant de la viande, nous constatons que l'activité mesurée au marché de Papeete pourrait être fortement sous-estimée par le modèle s'il s'agissait d'échantillons de viande de poulet. Dans le meilleur des cas, celui de la viande de bœuf, l'activité mesurée en ^{95}Zr (et dans une moindre mesure ^{103}Ru) demeurerait fortement sous-estimée.

En ce qui concerne les denrées lagunaires, l'absence d'analyses radiologiques des eaux de lagon rend leurs activités calculées très incertaines. Et comme celle-ci n'ont été que très peu mesurées à l'échelle journalière, il est en définitive très difficile de valider, conforter ou ajuster la dynamique de contamination prédite par le modèle aux échelles infra-mensuelles.

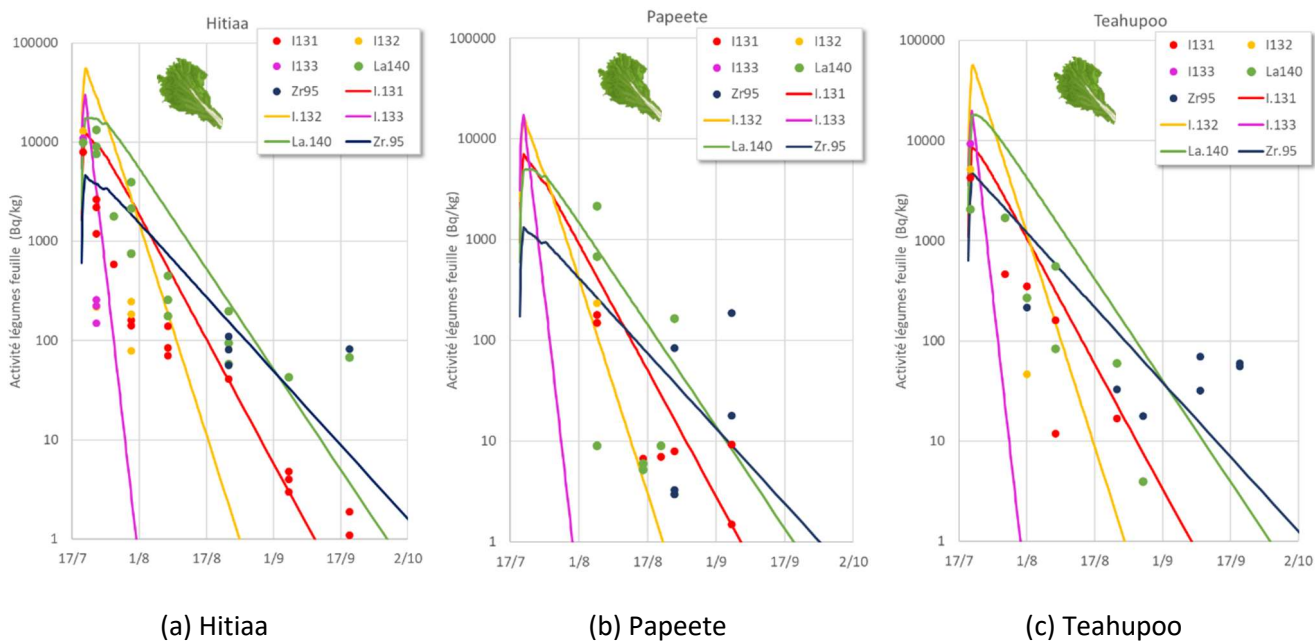


Figure 24. Evolutions comparées des activités massiques modélisées et observées dans les légumes feuille collectés à Hitiaa, Papeete et Teahupoo.

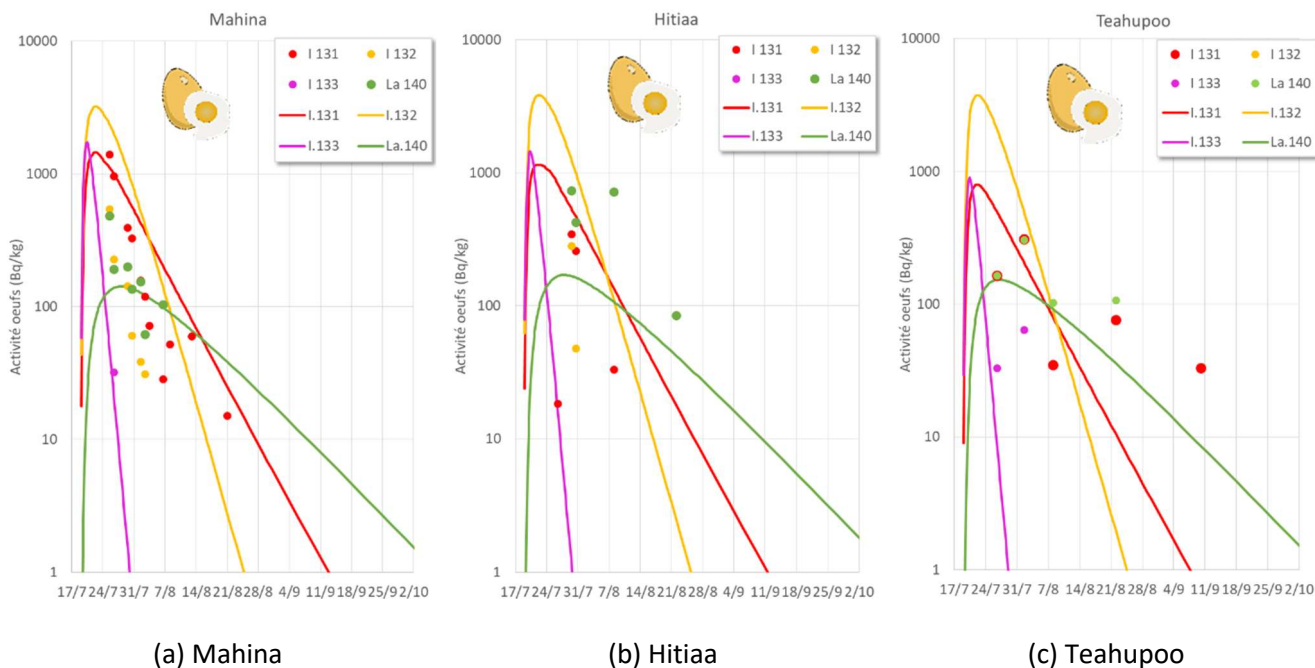
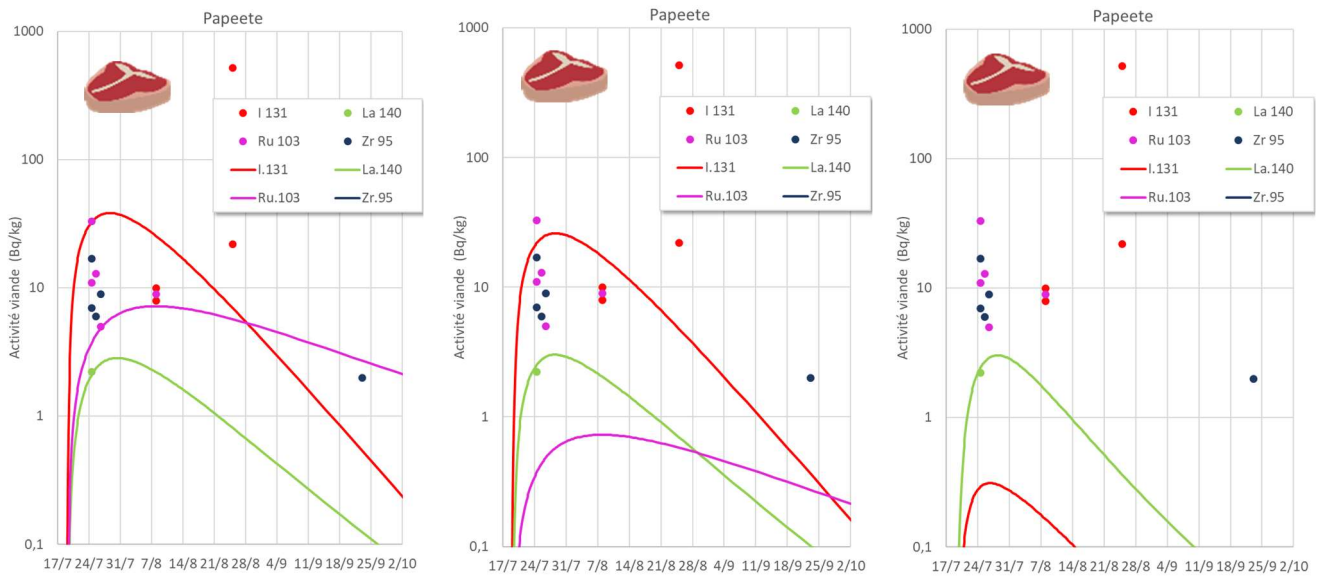


Figure 25. Evolutions comparées des activités massiques modélisées et observées dans les œufs de poule à Mahina, Hitiaa et Teahupoo

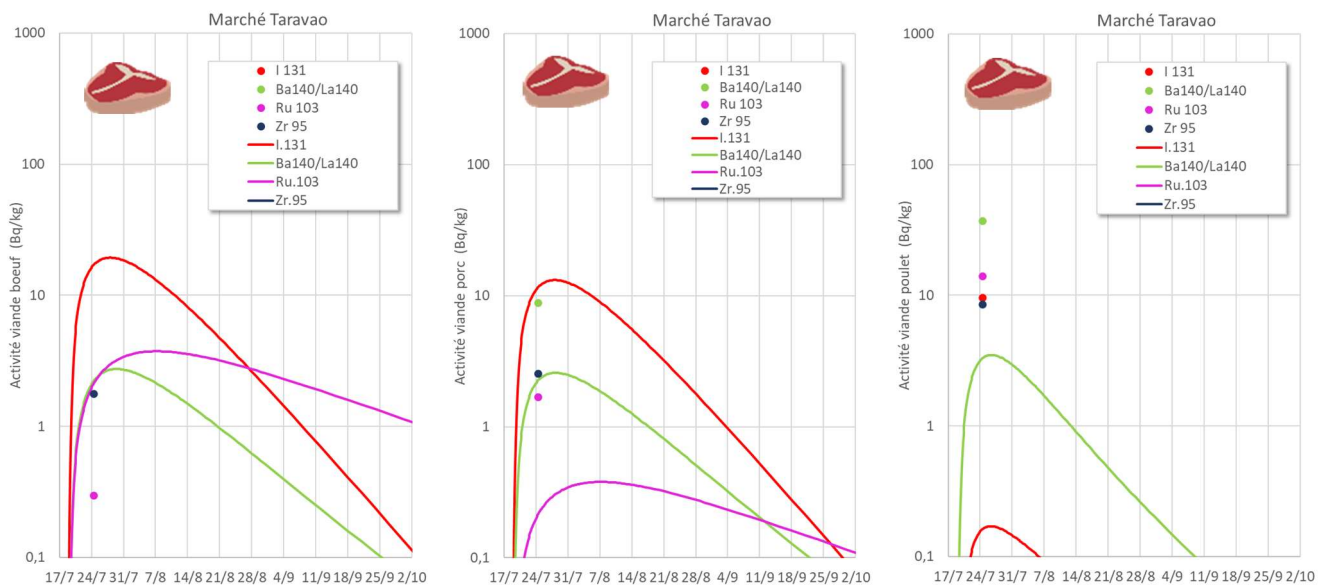


(a) Bœuf – marché de Papeete

(b) Porc - marché de Papeete

(c) Poulet - marché de Papeete

Figure 26. Evolutions comparées des activités massiques modélisées et observées dans la viande (de nature indéterminée) au marché de Papeete dans l'hypothèse où nous considérons qu'il s'agit d'une viande de bœuf (a), de porc (b) ou de poulet (c).



(a) Bœuf – marché de Taravao

(b) Porc - marché de Taravao

(c) Poulet - marché de Taravao

Figure 27. Evolutions comparées des activités massiques modélisées et observées dans la viande au marché de Taravao dans l'hypothèse où nous considérons qu'il s'agit d'une viande de bœuf (a), de porc (b) ou de poulet (c).

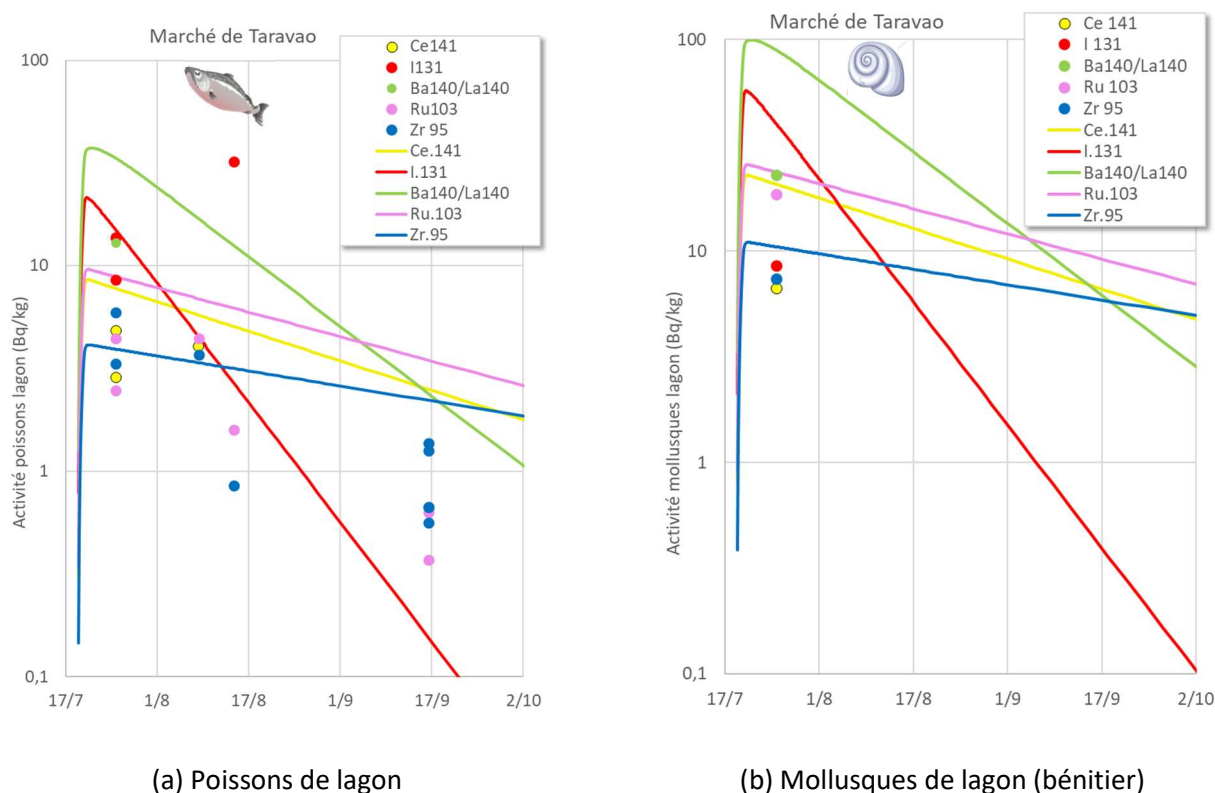


Figure 28. Evolutions comparées des activités modélisée et observée (valeurs journalières) dans les poissons de lagon (espèces variées) et les bénitiers collectés au marché de Taravao.

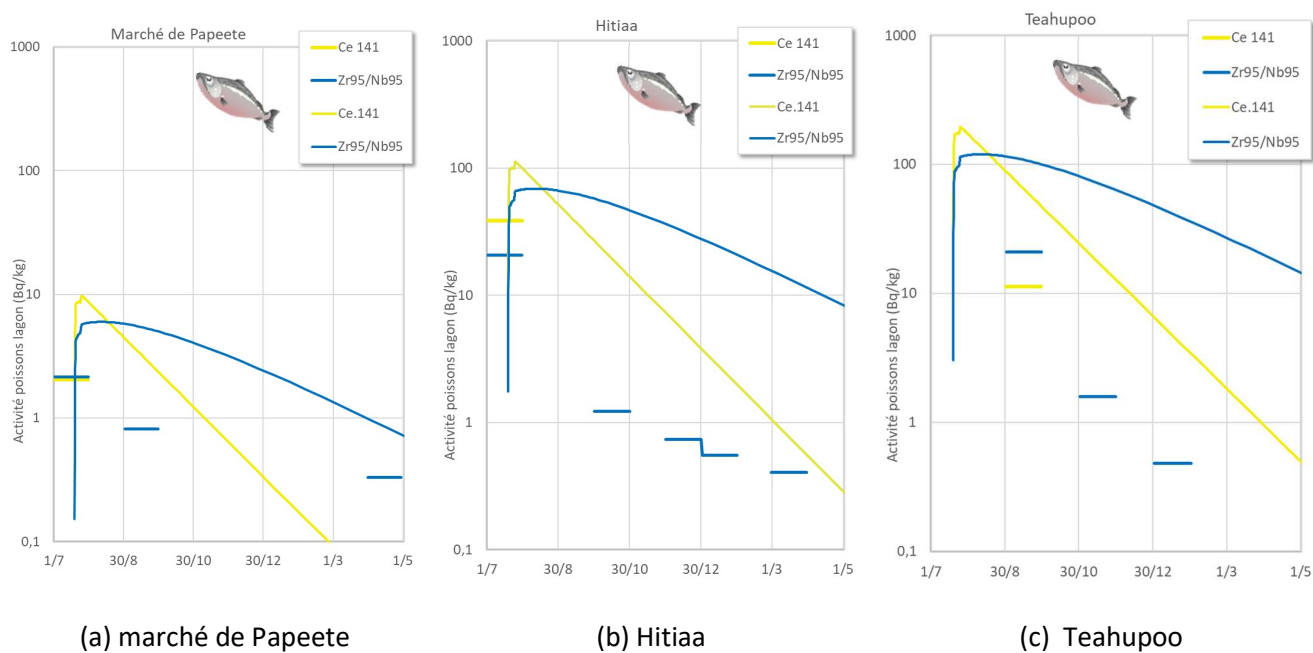


Figure 29. Evolutions comparées des activités modélisée et observée (valeurs mensuelles) dans les poissons de lagon (espèces variées) collectés au marché de Papeete, à Hitiaa et Teahupoo.

ANNEXE 4 : SCENARIOS D'EXPOSITION

Les calculs de dose aux populations humaines prennent en compte les principales voies d'exposition habituellement retenues pour les évaluations en situation d'exposition accidentelle des populations à des retombées atmosphériques : exposition externe au nuage radioactif et aux dépôts disséminés dans l'environnement, exposition interne par inhalation lors de l'immersion dans le nuage radioactif ainsi que d'air contaminé par remise en suspension des dépôts, et ingestion d'eaux de boisson et de denrées d'origine végétale (légumes) ou animale (lait, viandes, poissons et mollusques de lagon). Différents ensembles de population sont distingués suivant leur classe d'âge et leur ration alimentaire.

Les calculs dosimétriques ont été menés pour les populations habitant dans chacune des six localités mentionnées et pour les six classes d'âge habituellement considérées (0 à 1 an, 1 à 2ans, 2 à 7 ans, 7 à 12 ans, 12 à 17 ans et plus de 17 ans), ce qui conduit à différencier 36 sous-groupes de populations pour lesquels les paramètres des scénarios d'exposition, i.e. ration alimentaire, débit respiratoire et budget temps, sont différents.

Pour déterminer les niveaux de contamination auxquels les populations sont exposées par irradiation externe et par inhalation, il est considéré qu'elles demeurent dans leur localité d'origine et que la répartition du temps passé entre diverses activités est constante dans le temps. Cette approche simplifiée ignore donc tout déplacement entre localités et toute variabilité éventuelle dans les activités professionnelles ou les loisirs.

Pour l'inhalation, les paramètres de scénario sont le débit respiratoire (m^3/h) et le budget temps (h/j) qui permettent de calculer le flux d'activité incorporée par inhalation (Bq/j). Les valeurs des débits respiratoires utilisées qui dépendent de l'âge des personnes sont dérivées des valeurs moyennes préconisées par la Commission Internationale de Protection Radiologique (ICRP 66). Conformément aux hypothèses retenues pour l'étude (IRSN, 2019), il est supposé que la population passe 30% de son temps à l'intérieur des bâtiments et 70% du temps à l'extérieur, le scénario supposant alors que les activités sont menées en milieu terrestre. Il a été considéré que les concentrations dans l'air à l'intérieur des constructions sont égales à celles de l'air extérieur (pas de protection apportée par les habitations). Les coefficients de dose par unité d'incorporation utilisé (DPUI en Sv/Bq inhalés) pour les différentes classes d'âge sont issus de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 publié dans le Journal Officiel de la république française (JO 2003) et de la publication 72 de la CIPR (ICRP 72).

Pour l'exposition externe aux dépôts radioactifs, conformément aux hypothèses retenues pour l'étude (IRSN, 2019), il est encore supposé que la population passe 30% de son temps à l'intérieur des bâtiments, ceux-ci offrant un facteur de protection de 50% pour l'exposition externe. Pour les 70 % du temps passé à l'extérieur, le scénario suppose que les activités sont menées en milieu terrestre. L'exposition externe par baignade ou navigation dans le lagon n'a pas été prise en compte. Les coefficients de dose par unité d'activité surfacique ou volumique utilisés (Sv/j par Bq/m^2 ou Sv/j par Bq/m^3) sont issus de (EPA/FG 12, 1993).

La ration alimentaire utilisée pour évaluer les doses reçues par ingestion de denrées contaminées est déclinée par classe d'âge et lieu d'habitation. Pour les adultes, les rations alimentaires d'origine locale sont reprises de l'étude (IRSN, 2019) : la ration « Papeete, 1975 » spécifiée dans (IRSN 2019) est utilisée ici pour les populations urbaines de Mahina et Papeete, et la ration « Tahiti rural, 1975 » spécifiée dans (IRSN 2019) est utilisée pour les autres localités (Hitiaa, Pueu, Taravao et plateau de Taravao/Teahupoo). Pour rappel, il n'a pas été tenu compte des consommations de denrée dont la contamination n'a pas été reconstituée (eau de coco, coprah, fruits, chevrettes et langoustes) ou a été jugée négligeable dans un premier temps (poissons de profondeur, vivant en haute mer et ayant pu migrer sur de grandes distances, et autres poissons grands migrants). Pour les autres classes d'âge, à l'exclusion des bébés de moins d'un an, les rations alimentaires ont été déterminées en multipliant la ration de l'adulte par un facteur de proportionnalité propre à chaque classe d'âge et type de denrée. Les facteurs définis dans (IRSN, 2019) et dérivés de l'enquête INCA3 menée par l'Agence nationale de sécurité sanitaire (ANSES) en 2014-2015 ont été repris (pour les mollusques et crustacés, en l'absence de facteur de proportionnalité dans INCA3, le facteur établi pour les poissons a été utilisé). Pour les bébés de moins d'un an qui n'ont pas fait l'objet d'une évaluation dosimétrique dans (IRSN, 2019), la ration définie dans (CEA, 2006) a été retenue pour les six localités. Elle n'est pas spécifique à la Polynésie et à la période des essais

atmosphériques, et considère une consommation exclusive d'eau et de lait frais. Notons qu'il s'agit d'une hypothèse maximisante par rapport à une alimentation reposant sur le lait maternel ou maternisé. Enfin, la ration pour les œufs, absente de (IRSN, 2019), a été reprise de la ration utilisée dans l'étude du CEA (CEA, 2006), définie par classe d'âge.

Pour chacune des 6 localités, il a été supposé que l'eau de boisson, l'eau d'abreuvement des animaux, les denrées végétales et les produits marins étaient d'origine endogène. Les produits d'origine animale en revanche sont supposés provenir de Hitiaa pour les populations d'Hitiaa ou de Taravao pour les 5 autres localités. Cette hypothèse traduit essentiellement la réalité des productions laitières et de viande de bœuf discutée ci-après et est appliquée aux autres productions modélisées (viande de porc, poulet et œufs) bien que ces productions soient vraisemblablement d'origine endogène sur chaque localité. Concernant la filière bovine, si quelques élevages existent du côté d'Hitiaa, dont la production laitière était destinée à la consommation locale, l'essentiel du cheptel de Tahiti se situe du côté de Taravao, avec des productions de lait en 1973 de 0,8 millions de litres au plateau de Taravao et 0,3 millions de litres dans la région de Mataiea et du golfe Atimaono (au sud de la grande île) selon (CEA, 2006). Affecter l'origine des produits d'élevage bovin à Taravao, dont les dépôts sont 0,2 fois ceux de Mahina dans notre scénario, est minorant pour les élevages du plateau de Taravao et sans doute correct pour l'élevage de Mataiea, dont la cartographie des dépôts relatif indique un niveau entre 0,1 et 0,3 fois les dépôts de Mahina. Attribuer l'origine des produits de la filière bovine à la zone du plateau de Taravao-Teahupoo aurait été majorant, le dépôt y étant supposé être 4 fois celui de Mahina dans notre scénario, quand la carte de la *Figure 20* de l'annexe 2 suggère des valeurs de dépôt relatif plutôt comprises entre 0,4 et 1,2 sur le plateau par rapport à Mahina. Ce point est conforté par la comparaison modèle-mesures discutée au §Annexe 3 et représentée *Figure 4*.

Comme indiqué dans la méthodologie générale et bien que certains choix majorants ou minorants aient pu être identifiés, les hypothèses d'exposition des populations visent plutôt à reconstituer des doses moyennes. L'objectif n'est donc pas d'estimer les doses les plus élevées susceptibles de résulter de scénarios particuliers qui ont pu se produire : séjour dans les zones les plus contaminées éloignées du lieu habituel de résidence, rations systématiquement plus élevées pour les produits les plus contaminés, exposition par des voies particulières (eg travaux impliquant des remises en suspension importantes de terres contaminées), etc.

Enfin un coefficient de dose par unité d'incorporation (DPUI en Bq/Sv ingéré) permet d'estimer la dose par ingestion à partir des activités incorporées. Les DPUI utilisés dans cette étude pour calculer les doses efficaces pour les différentes classes d'âge, sont issus de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 (JO 2003) et de la publication 72 de la CIPR (ICRP, 72).

ANNEXE 5 : RESULTATS DOSIMETRIQUES COMPLEMENTAIRES

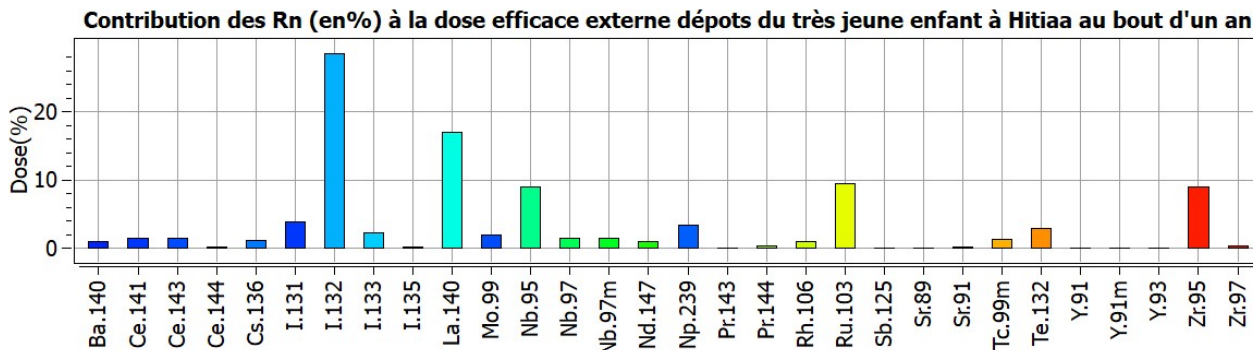


Figure 30. Contribution des radionucléides à la dose efficace externe aux dépôts à un an, du très jeune enfant à Hitiaa, prédite par SYMBIOSE.

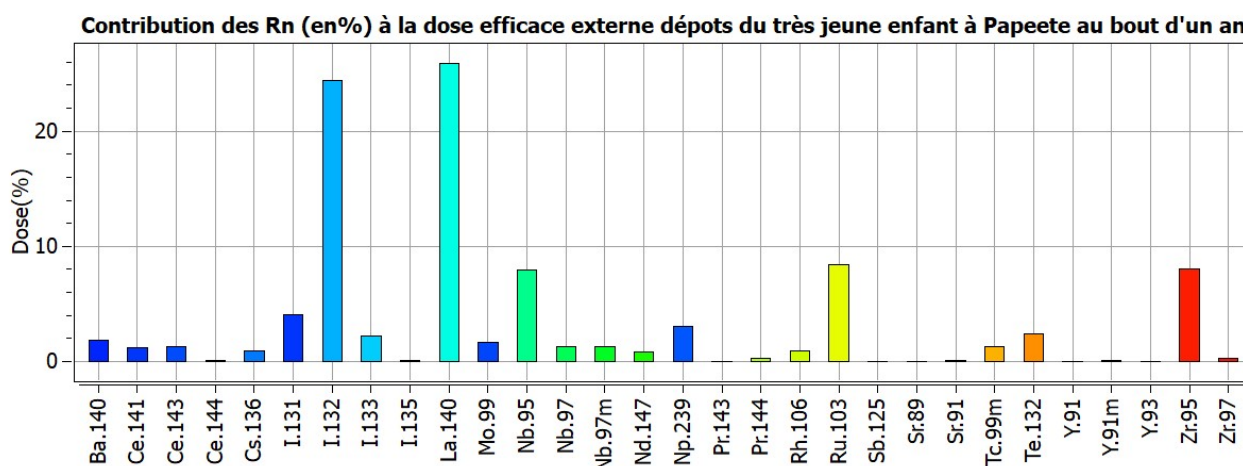


Figure 31. Contribution des radionucléides à la dose efficace externe aux dépôts à un an, du très jeune enfant à Papeete, prédite par SYMBIOSE.

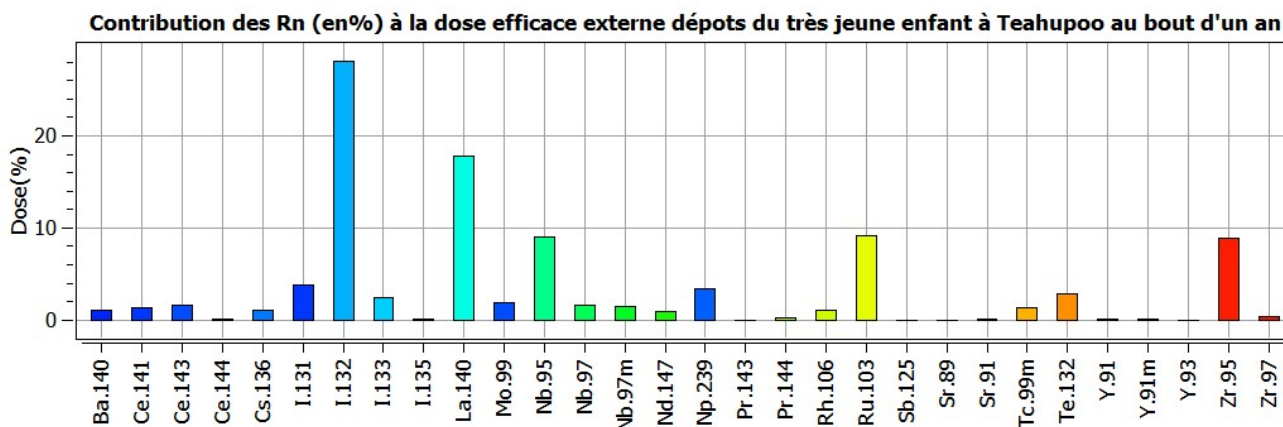


Figure 32. Contribution des radionucléides à la dose efficace externe aux dépôts à un an, du très jeune enfant à Teahupoo, prédite par SYMBIOSE.

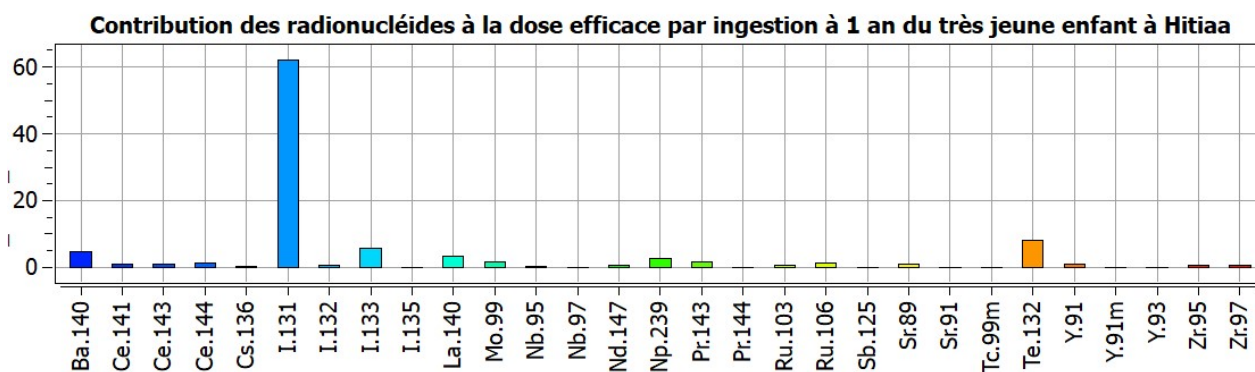


Figure 33. Contribution des radionucléides à la dose efficace ingestion à un an, du très jeune enfant à Hitiaa, prédite par SYMBIOSE.

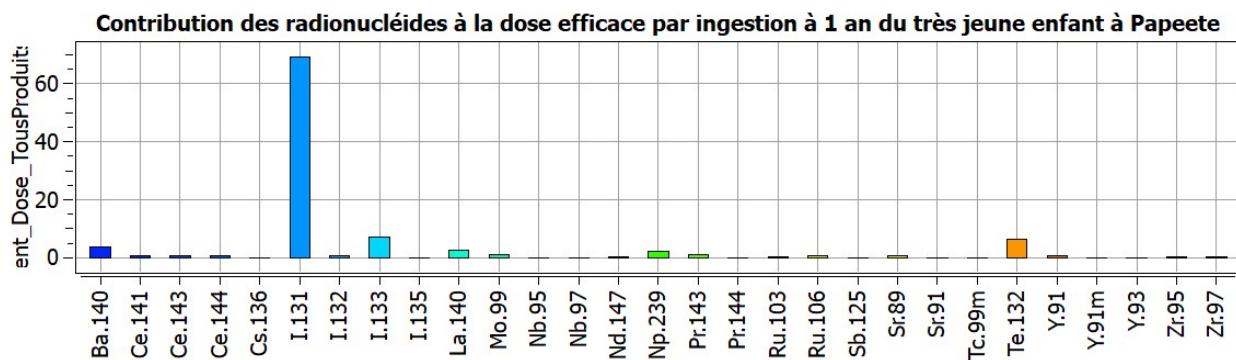


Figure 34 Contribution des radionucléides à la dose efficace ingestion à un an, du très jeune enfant à Papeete, prédite par SYMBIOSE.

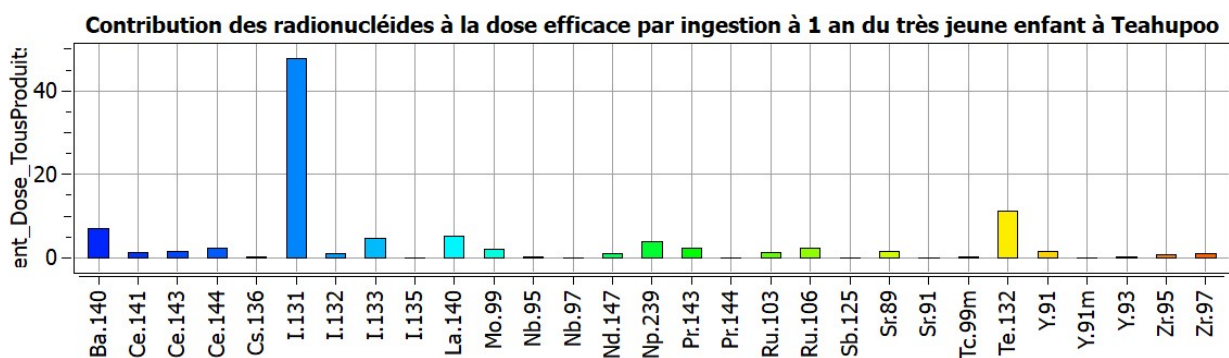


Figure 35. Contribution des radionucléides à la dose efficace ingestion à un an, du très jeune enfant à Teahupoo, prédite par SYMBIOSE.

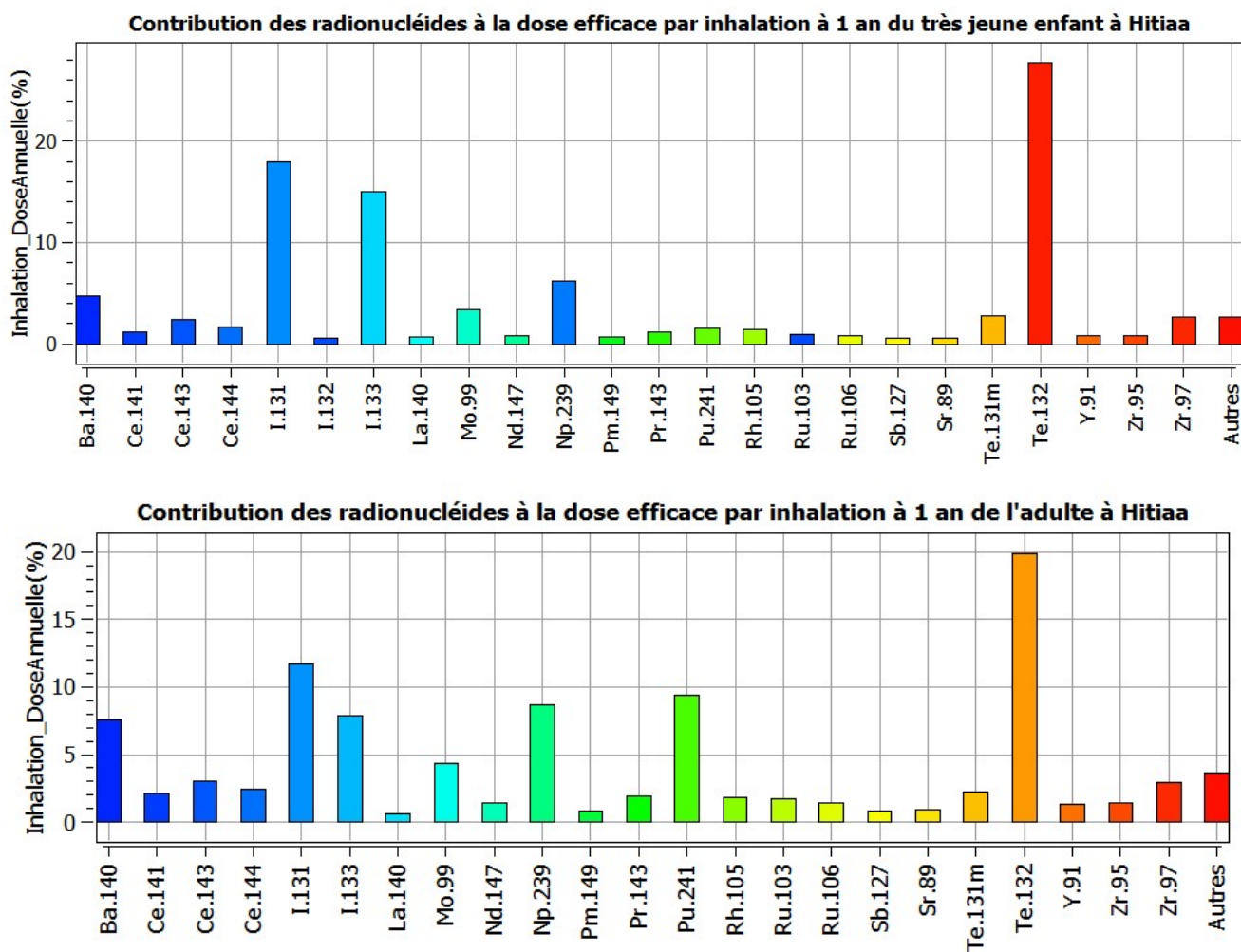
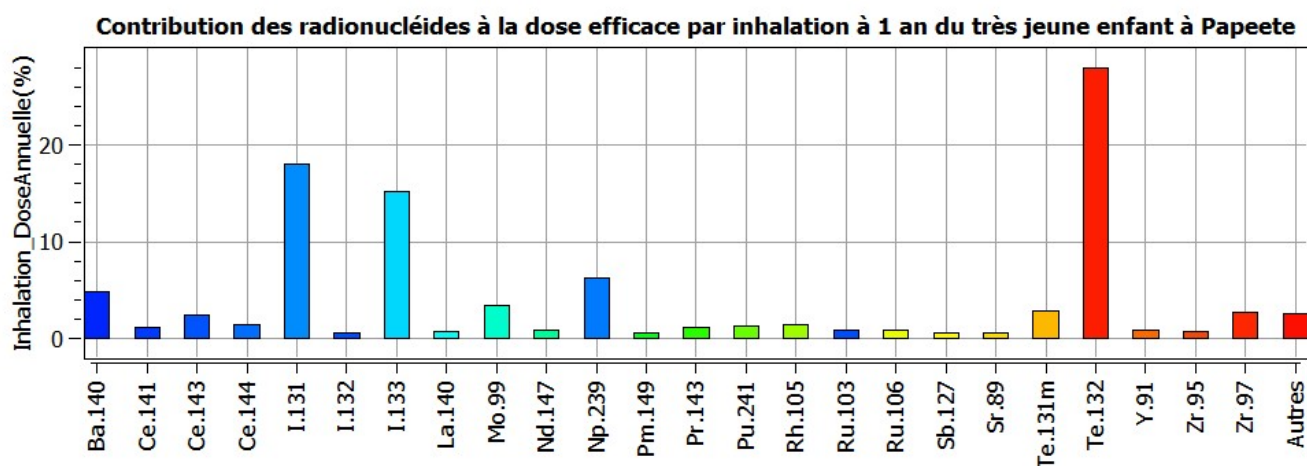


Figure 36. Contribution des radionucléides à la dose efficace inhalation à un an, du très jeune enfant et de l'adulte à Hitiaa, prédite par SYMBIOSE.



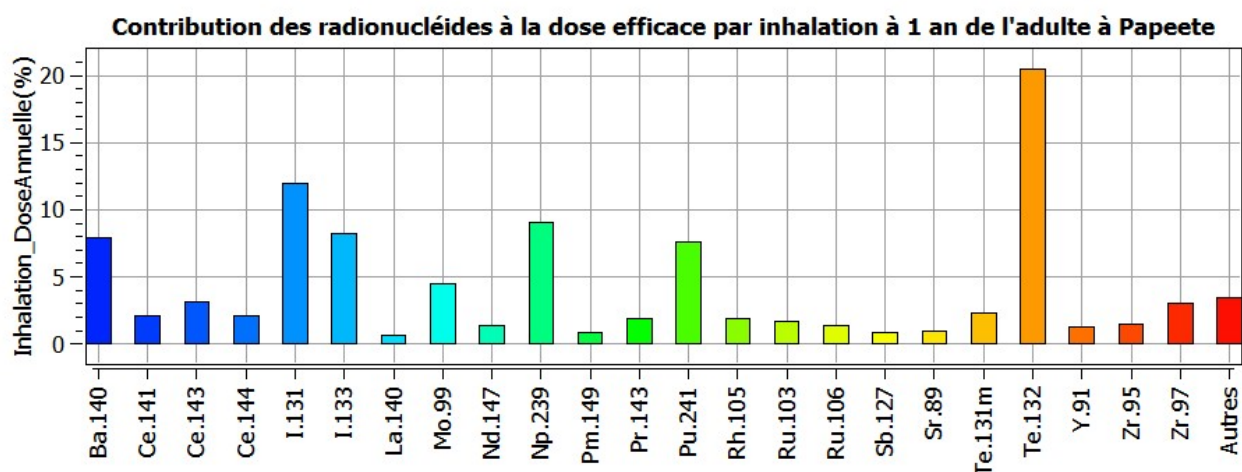


Figure 37. Contribution des radionucléides à la dose efficace inhalation à un an, du très jeune enfant et de l'adulte à Papeete, prédite par SYMBIOSE.

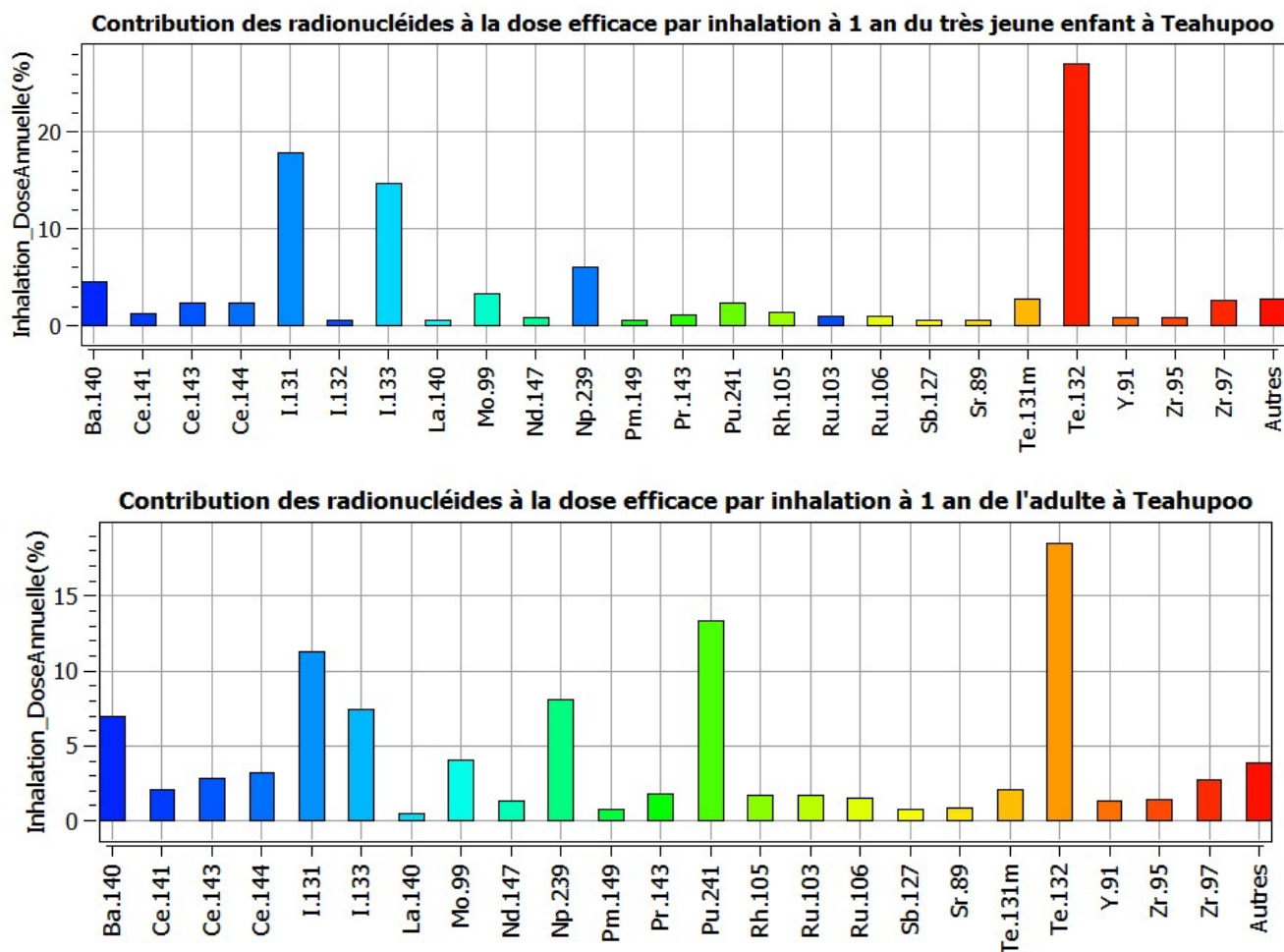


Figure 38. Contribution des radionucléides à la dose efficace inhalation à un an, du très jeune enfant et de l'adulte à Teahupoo, prédite par SYMBIOSE.

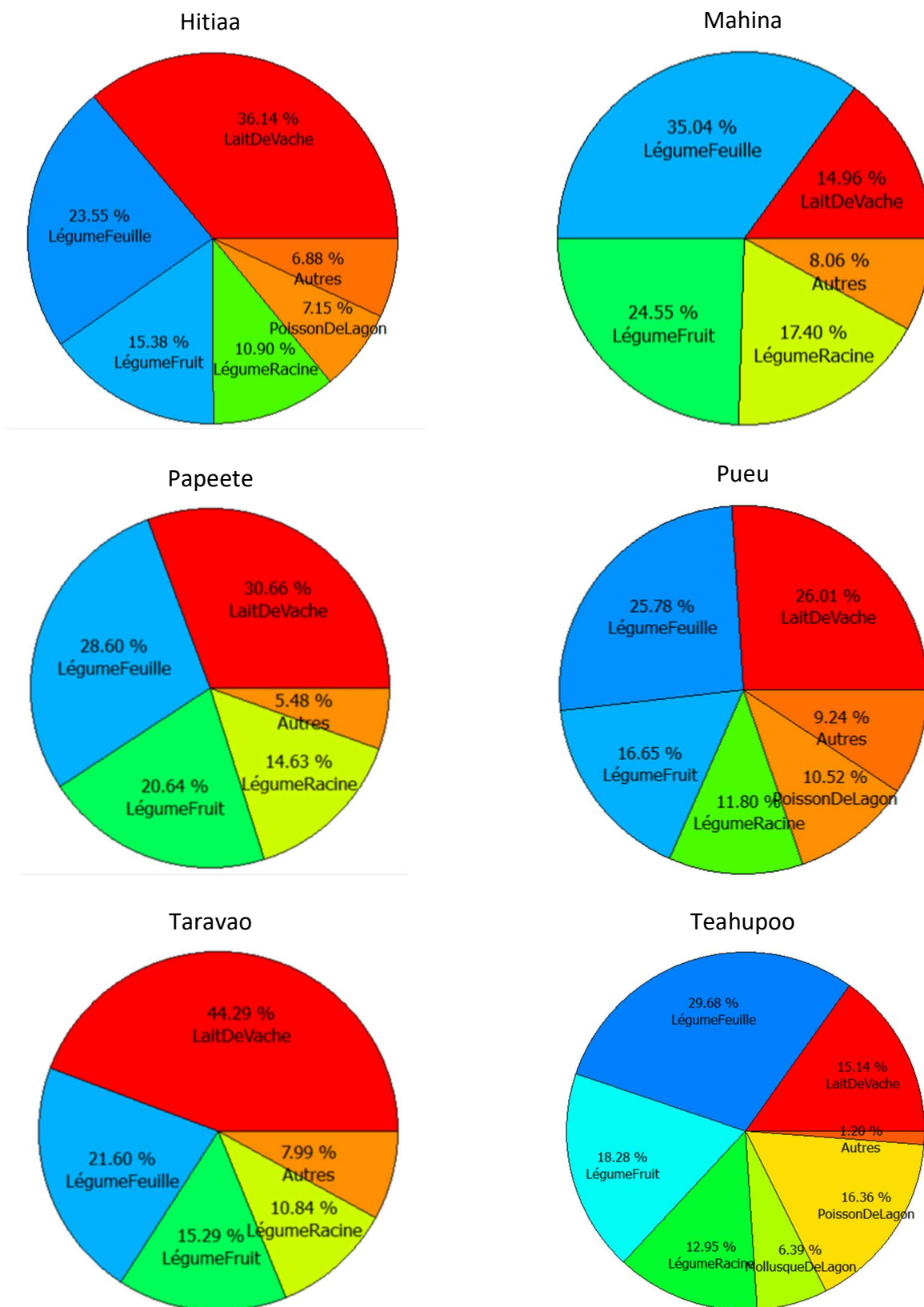


Figure 39 : Répartition par aliment de la dose efficace par ingestion à 1 an, pour le très jeune enfant (1-2 ans) (les contributions inférieures à 5% sont rassemblées dans 'Autres').



Figure 40 : Répartition par aliment de la dose efficace par ingestion à 1 an, pour l'adulte (les contributions inférieures à 5% sont rassemblées dans 'Autres')

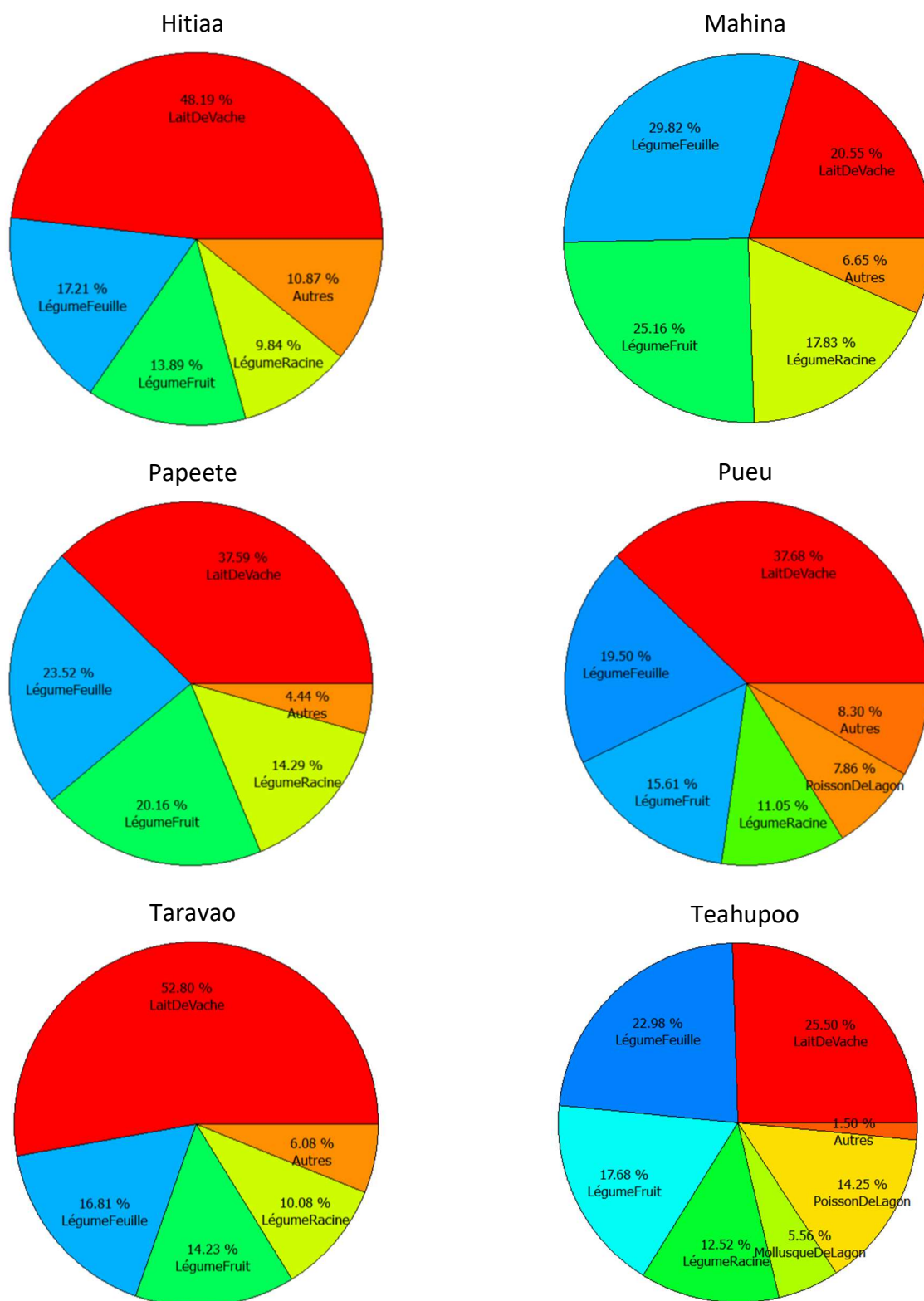


Figure 41 : Répartition par aliment de la dose thyroïde par ingestion à 1 an, pour le très jeune enfant (1-2 ans) (les contributions inférieures à 5% sont rassemblées dans 'Autres ')

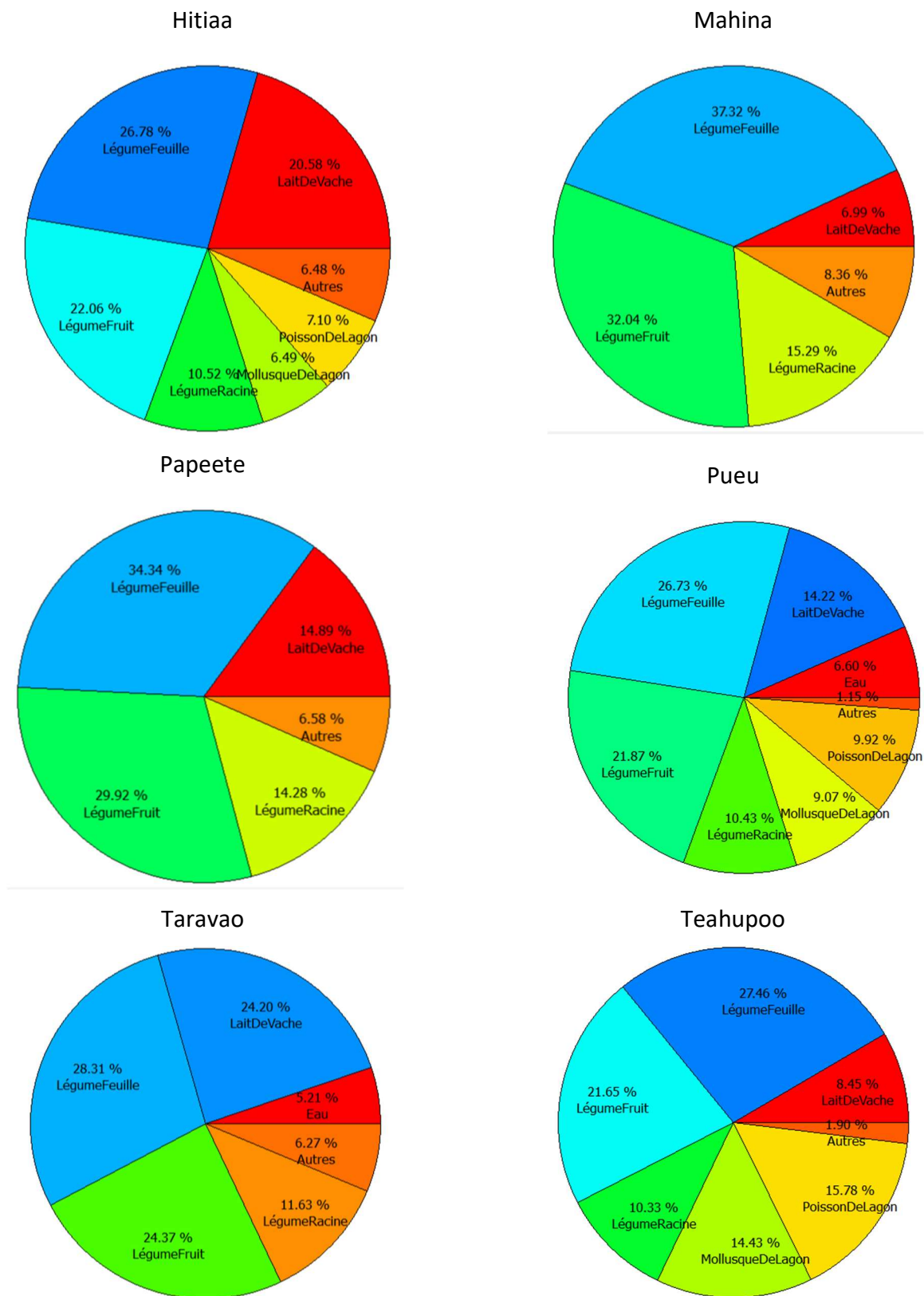


Figure 42 : Répartition par aliment de la dose thyroïde par ingestion à 1 an, pour l'adulte (les contributions inférieures à 5% sont rassemblées dans 'Autres')

