Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE

LA DIMENSION RADIOLOGIQUE DES ESSAIS NUCLÉAIRES FRANÇAIS EN POLYNÉSIE

À l'épreuve des faits





LA DIMENSION RADIOLOGIQUE DES ESSAIS NUCLÉAIRES FRANÇAIS EN POLYNÉSIE

À l'épreuve des faits

Préface

De 1966 à 1996, les installations du centre d'expérimentation du Pacifique ont permis à la France de devenir une puissance nucléaire majeure en réalisant, sur les atolls de Mururoa et Fangataufa, 193 essais nucléaires qui contribuèrent à doter les forces stratégiques aériennes puis océaniques. Durant trente ans, les équipes du commissariat à l'énergie atomique, les militaires de toutes les armées et les Polynésiens ont réalisé ensemble un travail remarquable dont tous les vétérans peuvent être légitimement fiers. Ces essais nucléaires font désormais partie de l'histoire de la Polynésie française. La France renouvelle sa gratitude à celles et à ceux qui ont ainsi contribué à garantir son autonomie stratégique et sa sécurité dans un monde toujours incertain.

Après une ultime campagne en 1995 et 1996, la France a démantelé de manière irréversible ses sites d'expérimentations du Pacifique et a choisi la voie de la simulation pour garantir la fiabilité et la sûreté de ses armes. En 1998, elle a signé et ratifié le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires et sollicité l'agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) pour établir un bilan radiologique et géomécanique des atolls de Mururoa et Fangataufa. L'AIEA a estimé qu'il n'était pas nécessaire de poursuivre la surveillance de la radioactivité dans l'environnement. Cependant, la France a décidé de mettre en place les moyens pérennes permettant d'assurer la continuité de cette surveillance. De la même façon, un système complet de capteurs permet de suivre en permanence le comportement du sous-sol des anciens atolls d'expérimentations.

Dans le cadre d'une démarche volontaire de transparence de l'Etat, la France publie cet ouvrage consacré aux aspects radiologiques des essais nucléaires. Il s'agit d'un ouvrage scientifique totalement inédit, fruit du travail des experts et vétérans du commissariat à l'énergie atomique et du ministère de la défense, que la France est, à ce jour, le seul pays doté d'armes nucléaires à rendre public. Il vient compléter les informations déjà publiées sur les atolls de Mururoa et Fangataufa. Il répond ainsi au souhait, souvent exprimé, de nos compatriotes de Polynésie de mieux connaître cette période pour en écrire son histoire.



Michèle ALLIOT-MARIE
Ministre de la Défense

Remerciements

Cet ouvrage, consacré aux aspects radiologiques des essais nucléaires réalisés en Polynésie française sur les atolls de Mururoa et Fangataufa, rassemble des informations couvrant de multiples domaines scientifiques et techniques. Il représente un travail considérable qui a été mené avec une grande rigueur afin d'offrir à son lecteur une vision la plus juste possible de la situation radiologique en Polynésie telle qu'elle a été observée depuis le premier essai. Son élaboration a nécessité la collaboration de nombreux spécialistes des diverses disciplines concernées. Une grande partie de leur travail a consisté à faire l'analyse des documents existant pour en extraire les informations les plus représentatives sur le sujet de 1966 à nos jours. Une autre partie du travail a requis des travaux particuliers. Ce document est donc le fruit d'un immense travail collectif dont il convient de remercier les nombreux contributeurs, notamment ceux qui ont également participé directement aux essais.

La majorité des données présentées est issue des études et mesures réalisées par le Service mixte de sécurité radiologique et le Service mixte de contrôle biologique, puis par le Service mixte de sécurité radiologique et biologique de l'homme et de l'environnement, ainsi que par le Service de santé des Armées et le Commissariat à l'énergie atomique. Cette synthèse s'appuie sur le travail de toutes les personnes qui, directement ou indirectement, ont été impliquées dans ces travaux, sur le terrain et en laboratoire : agents de radioprotection, physiciens de la mesure, radiochimistes, géologues, biologistes, infirmiers, médecins... Qu'elles en soient encore une fois remerciées ici.

Il convient également de souligner que les analyses, études et expertises émanant d'autres organismes français, comme l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, ou internationaux, comme l'Agence internationale de l'énergie atomique, ont été très précieuses lors de la rédaction de ce document.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à M. W. Delahaye, qui a réalisé la mise en page et l'illustration de l'ensemble de cet ouvrage.

Crédit photos : ECPA, CEA/Cadam, W. Delahaye, L. Villiers, R. Brand.

Table des matières

Chapitre I
Environnement des atolls de Mururoa et Fangataufa

I.1 - Géographie des atolls polynésiens 17
I.2 - Morphologie des atolls 19
I.2.1 - Atoll de Mururoa 21
I.2.2 - Atoll de Fangataufa 22
I.3 - Milieu physique 23
I.3.1 - Géologie 23
I.3.1.1 - Formations volcaniques 24
I.3.1.2 - Formations de transition 24
I.3.1.3 - Formations carbonatées 25
I.3.1.4 - Sols 25
I.3.2 - Conditions hydrogéologiques 26
I.3.3 - Conditions météorologiques 27
I.3.3.1 - Circulation atmosphérique dans le Pacifique Sud 27
I.3.3.2 - Conditions météorologiques en Polynésie française 28
I.3.3.3 - Perturbations atmosphériques en Polynésie 29
I.3.3.4 - Conditions météorologiques à Mururoa et Fangataufa 30
I.3.4 - Océanographie 32
I.3.4.1 - Courantologie du Pacifique Sud 32
I.3.4.2 - Courantologie des lagons 32
I.3.4.3 - Courantologie à proximité des atolls 34
I.3.4.4 - Propriétés des masses d'eau océaniques 35
I.4 - Milieu vivant 36
I.4.1 - Milieu terrestre 36
I.4.1.1 - Flore 37
I.4.1.2 - Faune 38

I.4.2 - Milieu marin 38
1.4.2.1 - Écosystème pélagique océanique 38
1.4.2.2 - Écosystème récifal 38
I.4.3 - Réseau trophique 43
I.5 - Pressions anthropiques **45**
I.5.1 - Aménagements d'installations humaines 45
I.5.2 - Effets des essais 47
I.6 - Conclusion **47**
I.7 - Bibliographie **48**

Chapitre II
Essais nucléaires et environnement

II.1 - Réactions nucléaires et radionucléides **53**
II.1.1 - Radionucléides libérés lors des essais nucléaires 53
II.1.1.1 - Matières nucléaires non consommées 54
II.1.1.2 - Traceurs de réaction 54
II.1.1.3 - Produits de fission 54
II.1.1.4 - Produits d'activation 55
II.2 - Types d'essais et transferts dans l'environnement **56**
II.2.1 - Essais atmosphériques 56
II.2.1.1 - Phénomènes physiques 58
II.2.1.2 - Formation du nuage radioactif 59
II.2.1.3 - Distribution initiale de la radioactivité au sein du nuage 61
II.2.1.4 - Décroissance de la radioactivité au sein du nuage 61
II.2.1.5 - Fractionnement des radionucléides au sein du nuage 64
II.2.1.6 - Évolution des produits d'activation 66
II.2.2 - Essais souterrains 66
II.2.2.1 - Phénomènes physiques 68
II.2.2.2 - Évolution hydrogéologique 69
II.2.2.3 - Mise en pression des gaz de la cavité 70
II.2.2.4 - Distribution initiale de la radioactivité dans la cavité 70
II.2.2.5 - Évolution de la radioactivité au sein de la cavité 72
II.2.2.6 - Émissions gazeuses lors des post-forages 73
II.2.2.7 - Transfert potentiel à la biosphère 75

II.3 - Mécanismes de transfert des radionucléides 75
II.3.1 - Dispersion atmosphérique des radionucléides 76
II.3.1.1 - Trajectoires 76
II.3.1.2 - Retombées radioactives 77
II.3.1.3 - Vitesse de dépôt 78
II.3.1.4 - Prévisions des retombées proches 79
II.3.2 - Évolution des dépôts 80
II.3.3 - Transfert aux organismes vivants 81
II.3.3.1 - Végétaux terrestres 83
II.3.3.2 - Animaux d'élevage 85
II.3.3.3 - Organismes marins 85
II.4 - Conclusion 87
II.5 - Bibliographie 88

Chapitre III
Matériels et méthode de la surveillance radiologique

III.1 - Laboratoires de surveillance de l'environnement 90
III.2 - Choix des composantes à surveiller 90
III.3 - Stratégie de prélèvement d'échantillons 92
III.3.1 - Sites d'expérimentations 92
III.3.1.1 - Repérage géographique des stations de surveillance 92
III.3.1.2 - Procédures de surveillance 93
III.3.2 - Polynésie française 96
III.3.3 - Réseau mondial français de surveillance radiologique 101
III.4 - Prélèvements d'échantillons environnementaux 101
III.4.1 - Prélèvements atmosphériques 101
III.4.1.1 - Aérosols 101
III.4.1.2 - Eaux de pluie 102
III.4.2 - Prélèvements en domaine terrestre 103
III.4.2.1 - Eau de source/ruisseau 103
III.4.2.2 - Eau de boisson 103
III.4.2.3 - Sols 103
III.4.2.4 - Végétaux 105
III.4.2.5 - Productions agricoles polynésiennes 107

III.4.3 - Prélèvements en domaine marin 109
III.4.3.1 - Eau de mer 109
III.4.3.2 - Sédiments 111
III.4.3.3 - Plancton 111
III.4.3.4 - Algues benthiques 112
III.4.3.5 - Coraux 113
III.4.3.6 - Holothuries 114
III.4.3.7 - Mollusques 114
III.4.3.8 - Crustacés 116
III.4.3.9 - Poissons 117
III.5 - Mesures de la radioactivité 119
III.5.1 - Aérosols atmosphériques 119
III.5.2 - Eaux de mer 121
III.5.3 - Échantillons biologiques 121
III.5.3.1 - Conditionnement des échantillons 121
III.5.3.2 - Préparation des échantillons 123
III.5.3.3 - Mesures des échantillons 123
III.6 - Exercices d'intercomparaison 124
III.6.1 - Exercice d'intercomparaison AIEA-plancton 125
III.6.2 - Exercice d'intercomparaison AIEA-aliments 125
III.7 - Conclusion 128
III.8 - Bibliographie 130

Chapitre IV
Évolution de la radioactivité des sites d'expérimentations

IV.1 - Atmosphère 132
IV.1.1 - Indice bêta global 132
IV.1.2 - Radionucléides émetteurs bêta-gamma 134
IV.1.3 - Isotopes du plutonium 135
IV.2 - Sols 135
IV.2.1 - Radionucléides émetteurs bêta-gamma 136
IV.2.1.1 - Mururoa 136
IV.2.1.2 - Fangataufa 139
IV.2.2 - Isotopes du plutonium 140
IV.2.2.1 - Mururoa 140
IV.2.2.2 - Fangataufa 144
IV.2.3 - Débit de dose 145

IV.3 - Plantes terrestres **147**
IV.3.1 - Radionucléides émetteurs bêta-gamma 148
IV.3.1.1 - Radionucléides de période inférieure ou égale à l'année 148
IV.3.1.2 - Radionucléides de période supérieure à 5 ans 148
IV.3.2 - Isotopes du plutonium 152
IV.3.3 - Facteurs de transfert *in situ* sol-plante 154
IV.4 - Eaux de mer **155**
IV.4.1 - Indice bêta global 155
IV.4.1.1 - Essais sur barge 155
IV.4.1.2 - Essais sous ballon 156
IV.4.2 - Radionucléides émetteurs bêta-gamma 158
IV.4.2.1 - Radionucléides de période inférieure ou égale à l'année 158
IV.4.2.2 - Radionucléides de période supérieure à 5 ans 160
IV.4.3 Isotopes du plutonium 164
IV.4.3.1 - Essais atmosphériques 164
IV.4.3.2 - Essais souterrains 165
IV.5 - Sédiments marins **169**
IV.5.1 - Radionucléides émetteurs bêta-gamma 170
IV.5.2 - Isotopes du plutonium 172
IV.5.3 - Bilan 176
IV.6 - Flore et faune marines **177**
IV.6.1 - Radionucléides de période inférieure ou égale à l'année 177
IV.6.1.1 - Plancton 177
IV.6.1.2 - Coraux 179
IV.6.1.3 - Mollusques 180
IV.6.1.4 - Poissons 182
IV.6.1.5 - Holothuries 185
IV.6.2 - Radionucléides de période supérieure à 5 ans 186
IV.6.2.1 - Algues benthiques 187
IV.6.2.2 - Plancton 188
IV.6.2.3 - Coraux 189
IV.6.2.4 - Mollusques 191
IV.6.2.5 - Poissons herbivores 194
IV.6.2.6 - Poissons carnivores 196
IV.6.2.7 - Holothuries 198
IV.6.3 Isotopes du plutonium 200
IV.6.3.1 - Algues benthiques 200
IV.6.3.2 - Coraux 201
IV.6.3.3 - Mollusques 202

IV.6.3.4 - Poissons herbivores 204
IV.6.3.5 - Poissons carnivores 205
IV.6.3.6 - Holothuries 205
IV.7 - Conclusion 207
IV.8 - Bibliographie 208

Chapitre V
Évolution de la radioactivité en Polynésie française

V.1 - Atmosphère 211
V.1.1 - Indice bêta global 212
V.1.2 - Radionucléides de période supérieure à 5 ans 215
V.1.3 - Isotopes du plutonium 215
V.2 - Sols 216
V.2.1 - Radioactivité des sols de Tahiti 217
V.2.1.1 - Indice bêta global 217
V.2.1.2 - Radionucléides de période supérieure à 5 ans 218
V.2.2 - Radioactivité des sols de Mangareva 219
V.2.3 - Débit de dose environnemental 221
V.3 - Plantes terrestres 222
V.3.1 - Indice bêta global 222
V.3.2 - Radionucléides de période supérieure à 5 ans 223
V.4 - Production agricole : le lait 224
V.4.1 - Radionucléides de période inférieure à 1 an 225
V.4.2 - Radionucléides de période supérieure à 5 ans 226
V.5 - Eaux océaniques 227
V.5.1 - Tritium 227
V.5.2 - Radionucléides de période supérieure à 5 ans 229
V.5.3 - Isotopes du plutonium 230
V.5.4 - Radioactivité des eaux de mer mondiales 231
V.6 - Flore et faune marines 232
V.6.1 - Plancton 232
V.6.1.1 - Radionucléides de période supérieure à 5 ans 233
V.6.1.2 - Isotopes du plutonium 234

V.6.2 - Poissons pélagiques 235
V.6.2.1 - Radionucléides de période inférieure ou égale à l'année 235
V.6.2.2 - Radionucléides de période supérieure à 5 ans 237
V.6.2.3 - Isotopes du plutonium 239
V.7 - Conclusion **240**
V.8 - Bibliographie **242**

Chapitre VI
Protection des travailleurs et des populations

VI.1 - Définition des unités de doses **245**
VI.2 - Réglementation relative à la radioprotection **246**
VI.2.1 - Concentrations maximales admissibles 247
VI.2.2 - Cas particulier de la thyroïde 248
VI.3 - Organisation de la radioprotection **248**
VI.4 - Organisation de la médecine du travail sur site **249**
VI.4.1 - Personnel du CEA 249
VI.4.2 - Personnel du ministère de la Défense 250
VI.4.3 - Personnel des entreprises sous-traitantes 250
VI.4.4 - Accidents du travail 251
VI.5 - Surveillance du personnel **251**
VI.5.1 - Exposition externe 251
VI.5.1.1 - Essais atmosphériques 253
VI.5.1.2 - Essais souterrains 254
VI.5.2 - Exposition interne 255
VI.5.2.1 - Examens anthropogammamétriques 255
VI.5.2.2 - Analyses radiotoxicologiques 256
VI.5.2.3 - Activités ayant entraîné des expositions internes 256
VI.6 - Radioprotection hors sites d'expérimentations **257**
VI.6.1 - Prévisions météorologiques 257
VI.6.2 - Prévisions des retombées et des débits de dose 258
VI.6.3 - Définition des zones d'exclusion 259
VI.6.4 - Processus de décision de déclenchement d'un essai 260
VI.6.4.1 - Gestion d'une situation imprévue 260
VI.6.4.2 - Exemple de l'essai Centaure 261

VI.6.5 - Surveillance radiologique des populations 263
VI.6.5.1 - Méthodologie des calculs de dose 263
VI.6.5.2 - Rations alimentaires 268
VI.6.6 - Évaluations radiologiques 271
VI.6.6.1 - Retombées sur l'atoll de Tureia 271
VI.6.6.2 - Retombées sur les îles Gambier 278
VI.6.6.3 - Retombées sur l'île de Tahiti 285
VI.6.6.4 - Bilan global des doses 292
VI.6.6.5 - Suivi radiologique des populations 293
VI.6.6.6 - Évaluation radiologique des essais souterrains 294
VI.7 - Conclusion **295**
VI.8 - Bibliographie **296**

Chapitre VII
Assainissements, surveillance actuelle et évolution radiologique future

VII.1 - Démantèlements et assainissements **298**
VII.1.1 - Assainissements en cours d'exploitation des sites 298
VII.1.1.1 - Zone PEE Empereur 298
VII.1.1.2 - Zone Faucon 299
VII.1.1.3 - Zone des expériences Arpège 299
VII.1.1.4 - Zone Colette 299
VII.1.1.5 - Installation Meknès 303
VII.1.2 - Assainissements en fin d'exploitation des sites 304
VII.2 - Gestion des déchets radioactifs **306**
VII.2.1 - Origine des déchets 306
VII.2.2 - Règles de classement 306
VII.2.3 - Conditionnement 307
VII.2.4 - Contrôle de l'activité 309
VII.2.5 - Options de stockage 310
VII.2.5.1 - Immersion des déchets radioactifs 310
VII.2.5.2 - Enfouissement des déchets radioactifs 315
VII.3 - Risques associés aux essais souterrains **318**
VII.3.1 - Rebouchage des puits d'essai 318
VII.3.1.1 - Puits à terre 318
VII.3.1.2 - Puits sous-marins 319

VII.3.2 - Évaluation des conséquences radiologiques futures 320
VII.3.2.1 - Évaluation de l'activité résiduelle confinée dans le sous-sol 322
VII.3.2.2 - Évaluation des taux de relâchement des radionucléides 323
VII.3.2.3 - Validation du terme source 324
VII.3.2.4 - Dispersion des radionucléides dans les eaux du Pacifique Sud 326
VII.3.2.5 - Évaluation des doses 328
VII.3.2.6 - Scenarii «disruptifs» 329
VII.4 - Surveillance actuelle des atolls **334**
VII.4.1 - Surveillance géomécanique de Mururoa 334
VII.4.1.1 - Objectifs de la surveillance géomécanique 336
VII.4.1.2 - Suivi continu de l'évolution de Mururoa 336
VII.4.1.3 - Suivi périodique de l'évolution géomécanique globale des atolls 338
VII.4.2 - Surveillance radiologique des atolls 338
VII.4.2.1 - Modalités de surveillance 339
VII.4.2.2 - Mesure de la radioactivité 341
VII.5 - Conclusion **342**
VII.6 - Bibliographie **344**

Annexe 1
Radionucléides et rayonnements

A1.1 - Notion d'atome **347**
A1.2 - Rayonnements et décroissance radioactive **348**
A1.2.1 - Période radioactive 348
A1.2.2 - Période biologique et période effective 348
A1.2.3 - Vallée de la stabilité 349
A1.3 - Types de rayonnements **349**
A1.3.1 - Rayonnements bêta 349
A1.3.2 - Rayonnements gamma 350
A1.3.3 - Rayonnements alpha 351
A1.3.4 - Autres types de rayonnements 351
A1.4 - Rayonnements et pouvoir de pénétration **351**
A1.5 - Réactions en chaîne **352**

Annexe 2
Liste des essais atmosphériques et souterrains réalisés au CEP 353

Annexe 3
Essais atmosphériques 359

Annexe 4
Organisation associée à la réalisation des essais nucléaires 451

A4.1 - Organisation du CEP 452
A4.1.1 - Groupement opérationnel des essais nucléaires 452
A4.1.2 - Commandement territorial 452
A4.1.3 - Direction des centres d'expérimentations nucléaires 454
A4.2 - Principales structures CEA 456
A4.2.1 - Direction des essais 456
A4.2.2 - Direction des applications militaires au Pacifique 457
A4.3 - Chronologie de l'organisation institutionnelle 457
A4.4 - Déroulement d'un essai 460
A4.4.1 - Période des essais atmosphériques 460
A4.4.1.1 - Évacuation temporaire des sites 460
A4.4.1.2 - Retour sur site 461
A4.4.1.3 - Suivi dosimétrique 462
A4.4.2 - Période des essais souterrains 462
A4.4.2.1 - Dispositions particulières 462
A4.4.2.2 - Prévention du risque hydraulique 463

Glossaire 465

Sigles et acronymes 471

CHAPITRE I

Environnement des atolls de Mururoa et Fangataufa

Les atolls inhabités de Mururoa et de Fangataufa ont été choisis pour leur isolement géographique qui constituait un facteur favorable à la réalisation d'essais nucléaires atmosphériques tout en permettant d'assurer au mieux la sécurité des personnes et de l'environnement. Les milieux géologique, atmosphérique, océanique et biologique des deux atolls ont fait l'objet de nombreuses études ; ce chapitre en rappelle les principales caractéristiques.

Initialement, les conditions météorologiques et océanographiques ont été prédominantes dans les procédures adoptées et dans le dimensionnement des infrastructures nécessaires aux essais atmosphériques. Par la suite, les conditions géologiques imposeront, à leur tour, les techniques de forages et de réalisation des essais souterrains. La description de ces conditions naturelles s'avère donc nécessaire à la compréhension des relations entre les essais nucléaires et les mesures prises pour la protection des populations et de l'environnement.

Les informations rappelées dans ce chapitre permettront au lecteur de resituer les données relatives à la radioactivité présentées dans les chapitres traitant du transfert des radionucléides dans l'environnement local des atolls d'expérimentations et plus généralement de la Polynésie française, ainsi que de l'évaluation des impacts radiologiques potentiels sur le personnel travaillant sur les sites et sur les populations polynésiennes.

I.1 - GÉOGRAPHIE DES ATOLLS POLYNÉSIENS

Au cœur de l'océan Pacifique, la Polynésie française constitue un vaste domaine composé de 118 îles, situées entre les latitudes 8° et 28° S, et entre les longitudes 134° et 155° W. De dimensions comparables à celles de l'Europe (2 700 km d'est en ouest et de 2 300 km du nord au sud), la Polynésie représente une surface maritime de près de 5,5 millions de km^2 pour une superficie totale des terres émergées de 3 430 km^2, soit 1/1 000^{e} de la surface de l'océan Pacifique. Elle est composée de 5 grands archipels : Société (dont fait partie Tahiti) et Marquises au nord, Tuamotu au centre, Australes au sud et Gambier au sud-est.

Les atolls de Mururoa et Fangataufa, distants d'une quarantaine de kilomètres l'un de l'autre, se trouvent à l'extrémité sud-est de l'archipel des Tuamotu, auquel ils sont rattachés administrativement. Ils font partie de l'alignement géologique «Pitcaim-Gambier». Situés au nord du tropique du Capricorne, à proximité du 139^{e} méridien Ouest, ils sont distants de 5 000 km de



FIG. 1. - Situation de la Polynésie française dans l'océan Pacifique.

la Nouvelle-Zélande et de plus de 6 000 km des côtes australiennes et américaines (Fig. 1).

En 1960, la population polynésienne s'élevait à environ 80 000 habitants et atteignait 220 000 habitants en 1996, l'essentiel de la population résidant sur l'île de Tahiti (70%). Les atolls de Mururoa et Fangataufa étaient inhabités lors de leur cession à l'État français, en 1964. Ils sont situés dans une zone très faiblement peuplée comptant moins de 2 500 habitants dans un rayon de 500 km et moins de 5 000 dans un rayon de 1 000 km (Fig. 2). Tureia, l'île habitée la plus proche, se trouve à 110 km des deux atolls d'expérimentations.



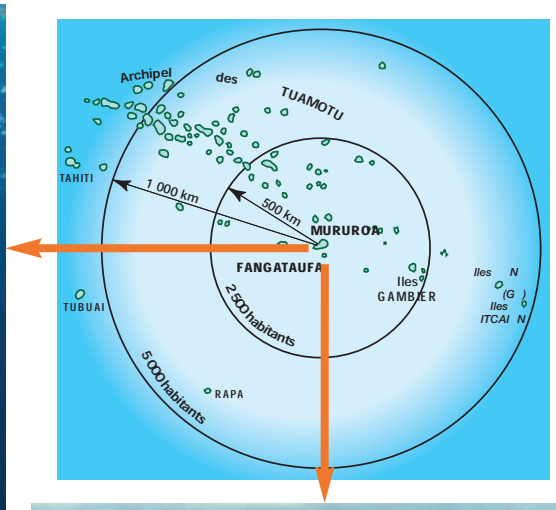




FIG. 2. - Situation des atolls de Mururoa et Fangataufa en Polynésie française et population en fonction de la distance autour de ces sites.

Le climat polynésien est tropical et humide, sans écarts prononcés. Les températures moyennes annuelles sont modérées, de 21 à 23°C, et les contrastes thermiques saisonniers faibles. Les précipitations moyennes sont de 1 800 à 2 000 mm par an. L'ensoleillement est important, 250 heures par mois à Tahiti (côte Ouest). Les eaux des lagons sont chaudes, de 23 à 26°C, toute l'année. Ces conditions favorisent un mode de vie essentiellement à l'extérieur des habitations.

Concernant l'habitat, il faut distinguer d'une part Papeete et ses faubourgs, où se trouvent des immeubles modernes, des maisons de béton et parpaings, mais aussi des quartiers de constructions légères faites de bois et de tôle ondulée ; d'autre part, les zones éloignées des centres urbains de Tahiti, les autres îles et atolls, où se trouve un habitat très léger. Notons que, dans ces zones, les *fare* traditionnels faits de planchers en bois, de cloisons de lattes de bambou et de toits de feuilles de cocotiers sont de plus en plus souvent remplacés par des maisons reposant sur une dalle de béton, aux parois parfois soutenues par des parpaings et aux toits de tôle ondulée. Les ouvertures vers l'extérieur restent toujours larges, favorisant une bonne ventilation.

Le régime alimentaire des populations présente les caractéristiques générales suivantes : à Tahiti, il est varié et les productions en provenance de toute la Polynésie peuvent être trouvées en abondance. Papeete et ses faubourgs possèdent deux marchés approvisionnant à eux seuls environ 35 000 personnes en produits locaux (poissons, mollusques, crustacés, légumes, fruits, viande de porc) et de nombreux magasins d'alimentation, bien achalandés en denrées locales et importées. Les autres îles hautes disposent d'un large éventail de denrées locales, fruits, légumes, produits de la pêche et de denrées de première nécessité comme l'huile, le riz, la farine et le sucre arrivant par liaisons maritimes régulières. Le régime alimentaire des populations des îles basses, ou atolls, est essentiellement constitué de produits de la pêche locale, de noix de coco et de quelques élevages aviaires et porcins familiaux. Les denrées importées sont moins nombreuses et arrivent plus irrégulièrement.

À Mururoa, avant la création du Centre d'expérimentation du Pacifique (CEP), une société privée exploitait la cocoteraie et organisait des campagnes de récolte ponctuelles. Cette concession fut reprise par le CEP après indemnisation de cette société. Quant à Fangataufa, les autorités religieuses des îles Gambier en détenaient la concession. Aucune cocoteraie n'y était plantée.

I.2 - MORPHOLOGIE DES ATOLLS

La génèse et les structures géologiques des îles de Polynésie française et en particulier de celles des atolls de Mururoa et de Fangataufa ont fait l'objet de nombreuses études.

Comme l'ensemble des îles de Polynésie française, les atolls de Mururoa et Fangataufa sont d'anciens volcans recouverts de quelques centaines de mètres de roches carbonatées. Il s'agit d'îles basses constituées d'une couronne corallienne enserrant un lagon.

Ces îles sont toutes d'origine volcanique. Elles prennent naissance à l'aplomb de zones situées dans le manteau de l'écorce terrestre appelées points chauds. Le magma émis par un point chaud forme d'abord un volcan sous-marin, qui finit par émerger si l'activité volcanique produit un volume de lave suffisant. La plaque océanique sur laquelle reposent les îles de Polynésie française se déplace vers le nord-ouest à la vitesse de 11 cm par an. En revanche, les points chauds sont des zones fixes dans le manteau. Au cours du temps, les volcans issus d'un point chaud s'éloignent progressivement de la source magmatique qui les alimente. L'activité volcanique cesse et l'île évolue alors sous les effets de l'érosion aérienne, de l'érosion marine, et de différents phénomènes intéressant l'édifice volcanique, comme l'enfoncement par subsidence.

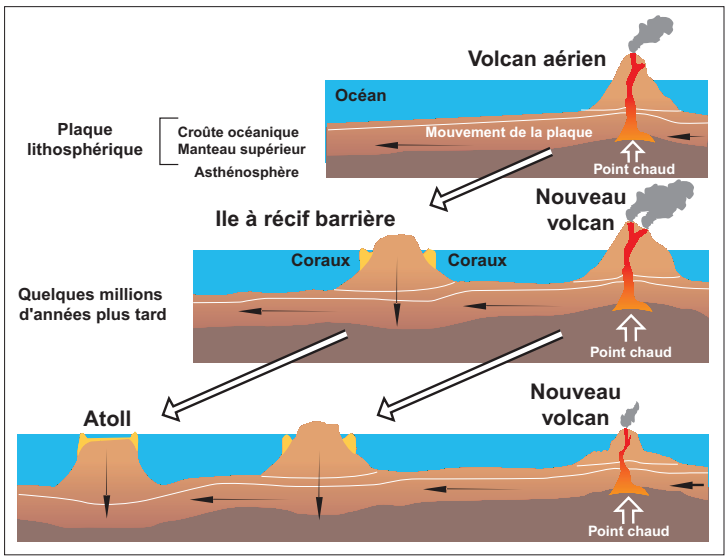


FIG. 3. - Du volcan à l'atoll : généré par le fonctionnement d'un point chaud, le volcan, entraîné par le déplacement du plancher océanique dont il est solidaire, quitte son lieu d'origine. Il passe ensuite par plusieurs stades ; présentant un récif-frangeant, puis un récif-barrière, pour arriver au stade d'atoll.

À l'inverse, des phénomènes biologiques de construction conduisent à l'édification de récifs coralliens sur les bords de l'île volcanique (Fig. 3).

Le stade ultime de l'évolution des îles volcaniques est l'atoll. Seule la couronne corallienne émerge autour d'un lagon central et 5 types de structures se succèdent alors de l'océan vers l'intérieur de l'atoll (Fig. 4) :

- la pente externe commençant à la limite des basses mers de vives eaux pour descendre vers les fonds océaniques, dont le niveau supérieur constitue la partie la plus vivante de l'atoll ;
- la crête algale (ou front récifal) sur laquelle se brisent les vagues et la houle du large ;
- le platier externe, en arrière de la crête algale, qui se termine par une levée détritique constituée par une accumulation de débris coralliens déposés par les vagues ;
- le secteur intermédiaire, entre l'océan et le lagon, est constitué d'une alternance de parties émergées (*motu*) et immergées (*hoa* et passes). Le *motu* est la seule partie émergée d'un atoll sur laquelle la faune et la flore terrestres peuvent prospérer. Les *hoa*, dépressions de faible profondeur (environ 1 m), proviennent de l'érosion de la couronne corallienne due aux courants entrants des eaux océaniques dans le lagon. Ils se distinguent de la passe, pouvant atteindre une profondeur supérieure à 10 m et une largeur supérieure au kilomètre ;
- les fonds du lagon, généralement sableux, souvent parsemés d'édifices coralliens dont certains atteignent la surface, forment alors un pinacle. Les bords du lagon sont, le plus souvent, frangés par un platier interne lagonaire.

En fonction de l'hydrodynamisme, le milieu marin de l'atoll se subdivise en trois zones :

- une zone océanique subissant l'influence de la houle du large, composée de : la pente externe, la crête algale et du platier externe ;
- une zone intermédiaire constituée par les *hoa* et, éventuellement, une ou plusieurs passes, par lesquels se font les échanges d'eau entre l'océan et le lagon ;
- un secteur interne, formé par le lagon proprement dit, dans lequel les courants se révèlent généralement faibles, sauf localement, au voisinage de la passe.

Aujourd'hui, cette morphologie correspond à celle des atolls de Mururoa et de Fangataufa où seule la couronne corallienne émerge autour d'un lagon central.

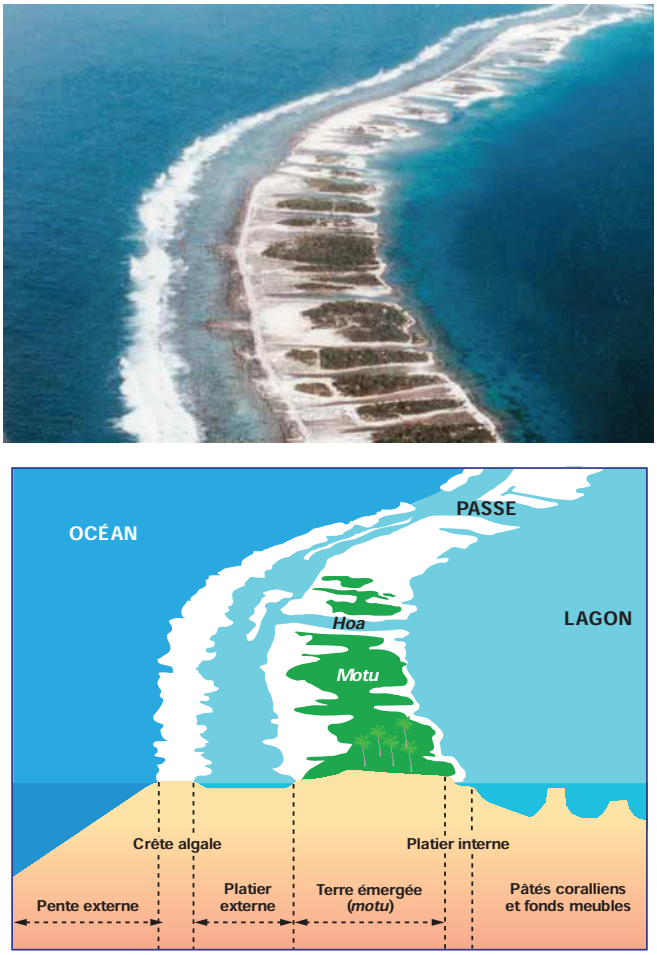


FIG. 4. - Coupe schématique océan-lagon explicitant les structures morphologiques d'un atoll.

I.2.1 - ATOLL DE MURUROA

Avec un périmètre d'environ 65 km, la couronne récifale de Mururoa forme le plus grand anneau corallien de la partie méridionale de l'archipel des Tuamotu. Elle émerge de trois mètres au maximum sur une largeur variant de 400 m au nord et 1 100 m à l'extrémité Ouest de l'atoll. Elle est constituée de matériaux biodétritiques grossiers et de sable corallien qui reposent sur une dalle corallienne indurée. Cette couronne, relativement continue au Nord et à l'Est, est découpée au Sud par les *hoa*. Les *motu* s'échelonnent sur environ 10 km du pourtour de l'atoll.

Le lagon de Mururoa s'étend sur 28 km de long par 10 km dans sa plus grande largeur. Sa superficie est de 140 km^2 pour un volume d'eau d'environ 4,7 milliards de mètres cubes. Sa profondeur moyenne est de 33,6 m. D'un point de vue morphologique, deux bassins se distinguent : le bassin oriental où les profondeurs atteignent 50 à 55 m et le bassin occidental qui est un appendice étroit du premier bassin où la profondeur moyenne est de 12 m (Fig. 5).

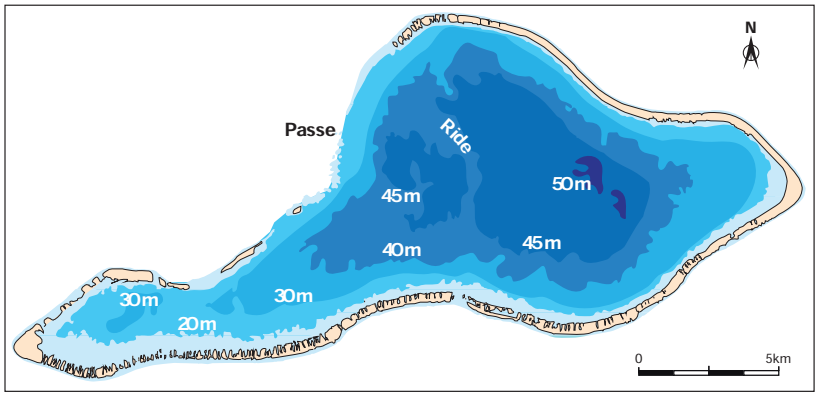


FIG. 5. - Bathymétrie simplifiée du lagon de Mururoa.

Les échanges d'eau entre le lagon et l'océan s'effectuent essentiellement par la passe et les *hoa* de la côte Sud-Ouest. Située au nord-ouest, la passe naturelle mesure 4,5 km de large pour une profondeur moyenne de 8 m. Les échanges d'eau s'y font principalement sous l'effet de la marée quotidienne : le lagon se remplit lors du flot et se vide lors du jusant. En général, les vitesses de courant sont faibles, inférieures à 0,3 m.s^{-1} et du même ordre de grandeur que celles des courants océaniques environnants. Les quantités d'eau transitant par la passe au rythme de la marée dépendent de son amplitude et des conditions océano-météorologiques. En moyenne, le flot apporte quotidiennement de l'ordre de 100 millions de m^3 d'eau et, à marée descendante, environ 150 millions de m^3 sont exportés. L'écart entre flux entrant et flux sortant provient de l'entrée d'eau océanique par les *hoa* de la partie Sud et les platiers inondés de la partie Ouest. Dans les *hoa*, le courant entrant est discontinu et irrégulier, modulé par la marée et les houles. Néanmoins, durant l'hiver austral, par forte houle du sud, l'apport par les *hoa* devient important et continu.

I.2.2 - ATOLL DE FANGATAUFA

De forme quasi hexagonale, la couronne corallienne de Fangataufa possède une superficie de 9 km^2 ; ses axes varient de 9,5 à 5 km. La largeur de la couronne atteint 300 m, en moyenne, pour une altitude maximale de 3 m. À l'origine, Fangataufa était un atoll fermé. En 1965, une passe artificielle de 100 m de largeur pour une profondeur moyenne de 8 m a été creusée sur la côte Nord-Ouest. Les côtes Est et Nord-Est, soumises aux vents dominants, sont continues, rectilignes et opposent une véritable barrière à la pénétration des eaux océaniques. La côte Ouest présente de nombreux *hoa* et des platiers submergés. La côte Sud ne comporte que deux ou trois *hoa* irrigués de façon occasionnelle. Ces discontinuités représentent un taux d'ouverture de l'ordre de 10 %.

La superficie du lagon de Fangataufa est de 39 km^2 pour un volume d'environ 560 millions de mètres cubes. Sa profondeur moyenne est de 14 m. D'un point de vue morphologique, le lagon se présente comme une cuvette dont la profondeur croît régulièrement des bords vers le centre (Fig. 6).

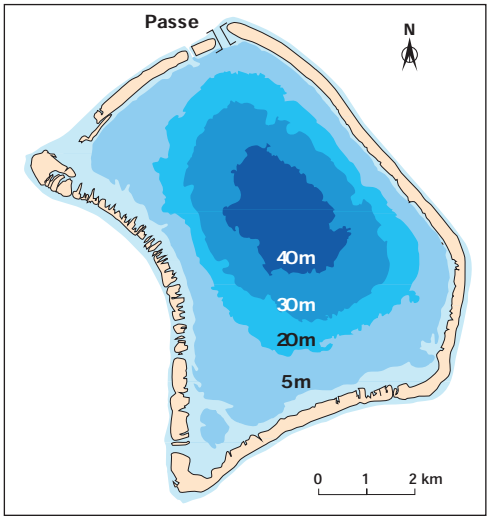


FIG. 6. - Bathymétrie simplifiée du lagon de Fangataufa.

Comme à Mururoa, les courants dans la passe évoluent en fonction de l'état de la marée et le flux sortant l'emporte sur le flux entrant. En revanche, il existe un déphasage entre l'onde de marée et l'établissement des courants dans la passe et dans le lagon. Des courants sortants moyens, de 0,60 m.s^{-1} (jusqu'à 2 m.s^{-1} à certaines périodes), sont observés pour des courants entrants deux fois plus faibles. L'estimation du flux sortant s'élève à 42 millions de m^3.j^{-1} pour un flux entrant d'environ 33 millions de m^3.j^{-1} ; l'apport d'eau moyen par les *hoa* étant estimé à 9 millions de m^3.j^{-1}.

Les échanges avec l'océan par les *hoa* contribuent, pour environ 30 %, au renouvellement de l'eau du lagon. Ce renouvellement est plus important lors de grandes houles de secteur ouest. Ce taux de participation des *hoa* au renouvellement de l'eau constitue un trait caractéristique de ce lagon.

I.3 - MILIEU PHYSIQUE

I.3.1 - GÉOLOGIE

L'ensemble des données acquises au moyen des forages et des campagnes de géophysique a permis de caractériser la nature et la répartition des formations géologiques (Fig. 7). En prenant en considération l'ordre chronologique de mise en place, de la base vers le sommet, trois ensembles sont distingués : les formations volcaniques, les formations de transition et les formations carbonatées.

Le pendage des formations est faible sous le lagon, de 2 à 3° dans les formations de transition et inférieur à 10° dans les formations volcaniques. En revanche, il augmente fortement au voisinage des flancs de l'atoll où il atteint, au niveau du toit du volcanisme, une valeur comprise entre 15 et 25°.

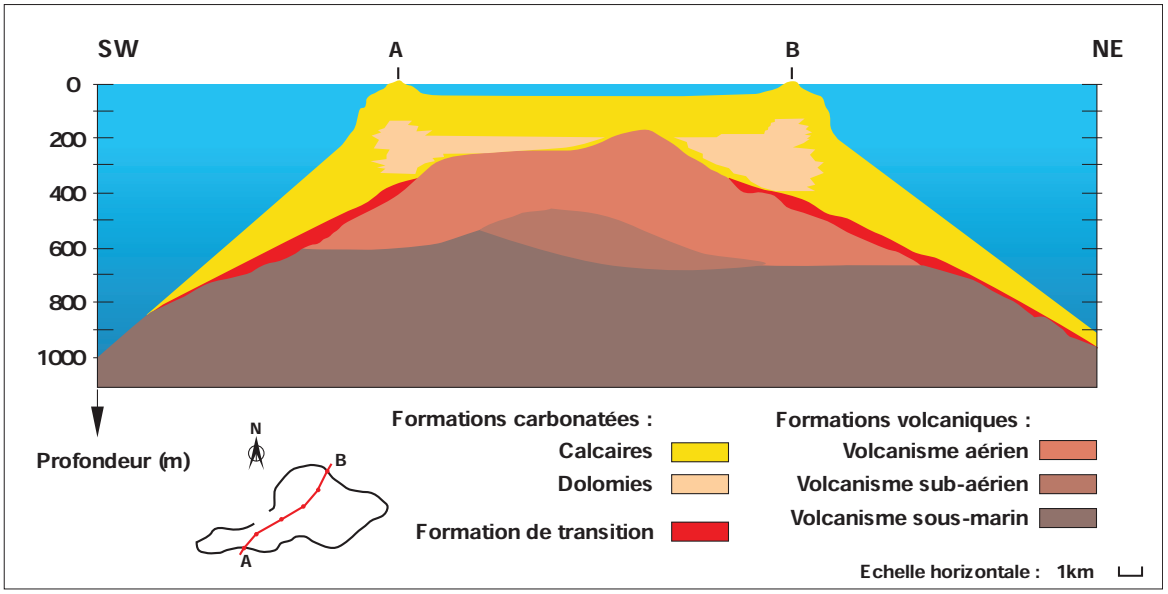


FIG. 7. - Coupe géologique suivant un axe orienté sud-ouest/nord-est à travers l'atoll de Mururoa.

I.3.1.1 - FORMATIONS VOLCANIQUES

Quatre formations volcaniques ont été identifiées et décrites en détail : sous-marine, aérienne, de transition et intrusive. La carte du toit du soubassement volcanique (Fig. 8) montre que sa position sous la couronne corallienne de Mururoa est plus profonde au nord (entre 400 et 450 m) qu'au sud (entre 300 et 350 m). Le sommet de l'édifice volcanique se trouve vers 170 m de profondeur, dans la partie centrale de l'atoll. Il constitue une ligne de crêtes, de 4 km de long sur 1 km de large, orientée sensiblement suivant la direction de la dérive de la plaque Pacifique. Au sud-ouest de cet axe haut, le toit du volcanisme, situé entre 250 et 275 m, présente une morphologie tabulaire avec un léger pendage (< 10°) vers le sud-ouest.

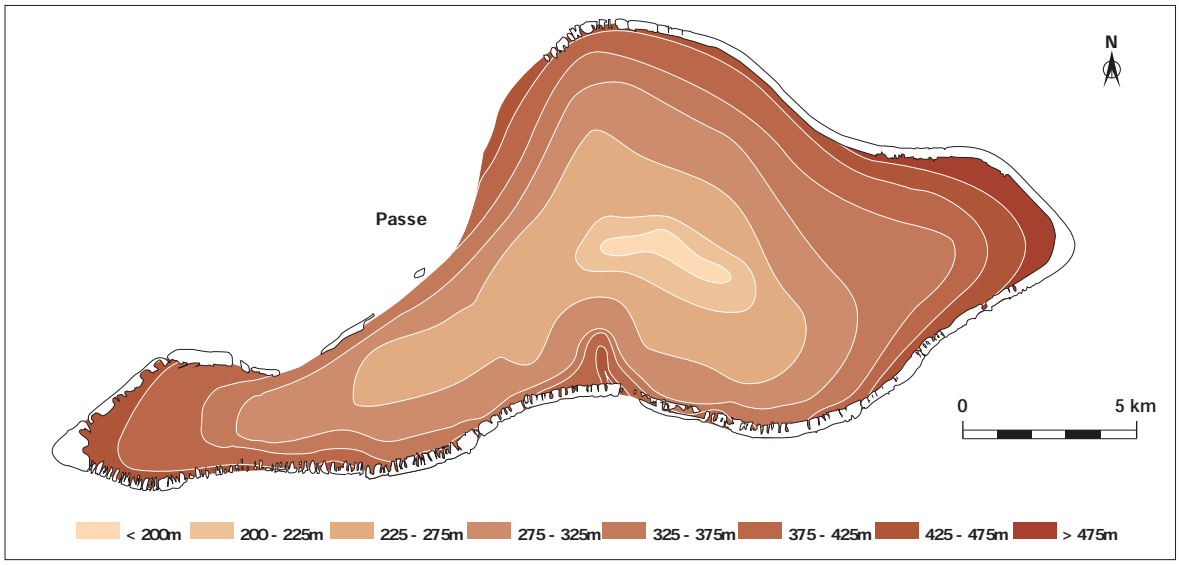


FIG. 8. - Profondeur du toit du soubassement volcanique de Mururoa.

À Mururoa, l'homogénéité isotopique indique une composition chimique constante du manteau source, durant une période supérieure à 1,2 million d'années.

I.3.1.2 - FORMATIONS DE TRANSITION

Les reliefs volcaniques insulaires de Polynésie française induisent des précipitations abondantes. Ils subissent ainsi, sous l'action de l'érosion, un véritable démantèlement par ravinement dont les effets peuvent être observés à Tahiti, Maupiti ou Moorea. Facteur érosif essentiel, le ruissellement entraîne la formation de vallées encaissées. Les produits provenant de l'érosion sont transportés, puis s'accumulent à la périphérie ainsi que dans les principales vallées drainantes des îles volcaniques (Fig. 9).

L'accumulation de ces différents produits d'érosion se trouve à l'origine des formations de transition constituées d'un conglomérat comprenant des éléments volcaniques et carbonatés. Étroitement dépendante de la morphologie et de l'état d'altération du relief volcanique, leur épaisseur varie en fonction de sa situation sur l'édifice volcanique. Quasiment inexistantes à la verticale du

lagon de l'atoll de Mururoa, les formations de transition atteignent une épaisseur de 100 m à la périphérie de l'atoll, à l'aplomb des anciens chenaux et vallées.

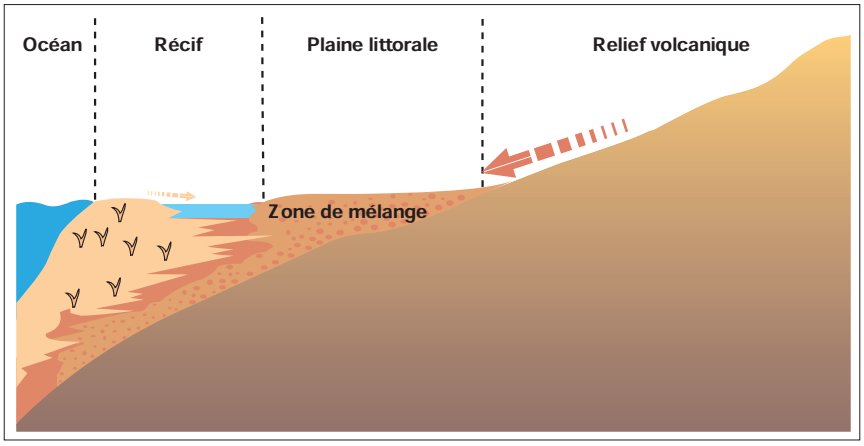


FIG. 9. - Création d'une zone de mélange à l'origine des formations de transition.

I.3.1.3 - FORMATIONS CARBONATÉES

D'origine récifale, la couverture carbonatée s'est constituée progressivement, par construction des divers organismes biologiques et par cimentation de leurs débris. Les organismes constructeurs les plus robustes, algues rouges et coraux massifs, se développent au niveau des zones fortement battues par l'océan, s'établissant principalement sur les reliefs, tandis que leurs débris se déposent à leur périphérie. À l'inverse, les organismes les plus fragiles (coraux frêles, par exemple) et les sédiments les plus fins, comme les sables, s'accumulent dans les zones abritées des vents dominants et de la houle ou à une profondeur plus importante.

L'épaisseur de la couverture carbonatée varie entre 130 m, au sommet du volcan, et 450 m, sous la couronne Nord. Les calcaires représentent la formation la plus superficielle. Ils ont une épaisseur d'environ 140 m, tant sous le lagon que sous la couronne. Les dolomies sous-jacentes constituent une masse de forme lenticulaire dont l'épaisseur maximale (300 m) est atteinte sous la couronne Nord-Est. Elles sont absentes au centre du lagon, là où le toit du volcanisme se trouve à une profondeur inférieure à 210 m.

Sous le lagon, la plus grande partie des dépôts calcaires s'avère peu consolidée, principalement en raison d'une absence de cimentation plutôt que d'une dissolution des matériaux originels. Seule la série inférieure contient des niveaux indurés (dalles) souvent karstifiés. À l'inverse, à la périphérie de l'atoll et plus particulièrement sur les flancs, jusqu'à une profondeur de 400 à 500 m, une intense cimentation consolide la partie calcaire.

I.3.1.4 - SOLS

Les îles hautes ont un sol latéritique formé par érosion sous l'action des eaux de ruissellement et par transformation du basalte primitif, beaucoup plus riche que les sols de la couronne récifale d'un atoll. Ces derniers sols, bien qu'assez diversifiés, sont peu évolués, c'est-à-dire qu'ils comptent peu d'humus et présentent de fortes carences en oligoéléments. Le substrat de base des

atolls est constitué d'une roche mère, de nature calcitique ou aragonitique, sous forme pierreuse ou sableuse, donc particulièrement bien drainée. Cette roche provient des squelettes des animaux et végétaux marins qui ont été rejetés par la mer puis entassés, ou du récif construit avant la dernière régression marine (3 000 ans).

Sur ce substrat de base, les débris des végétaux terrestres constituent ensuite la partie humifère organique qui va se décomposer pour former un sol. Cette matière organique, entre 0,1 et 2,5 % des sols, se trouve responsable, pour une bonne part, de la capacité de rétention de l'eau, de l'abaissement des pH basiques (de 8 à 8,4 dans le calcaire) et de l'adsorption cationique des oligoéléments. Les carences en fer et en magnésium sont à l'origine des chloroses végétales affectant la plupart des plantes et sont responsables du caractère à la fois pauvre et sélectif de la flore terrestre des atolls. Enfin, le sel, très présent dans ce milieu sous influence océanique, constitue un véritable poison physiologique limitant la flore aux espèces halophiles, seules capables de vivre sur des sols salés.

I.3.2 - CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

Le système des circulations naturelles dans le sous-sol des atolls de Mururoa et de Fangataufa a été décrit dans de nombreuses publications scientifiques. Schématiquement, il est induit par une «machine thermique» dont la source froide provient des eaux océaniques profondes (< 300 - 500 m) et la source chaude du flux géothermique terrestre qui réchauffe légèrement la roche et l'eau interstitielle à l'intérieur du massif. Cette eau, moins dense, se déplace vers le haut pour être remplacée par de l'eau froide océanique pénétrant par les flancs de l'atoll (Fig. 10).

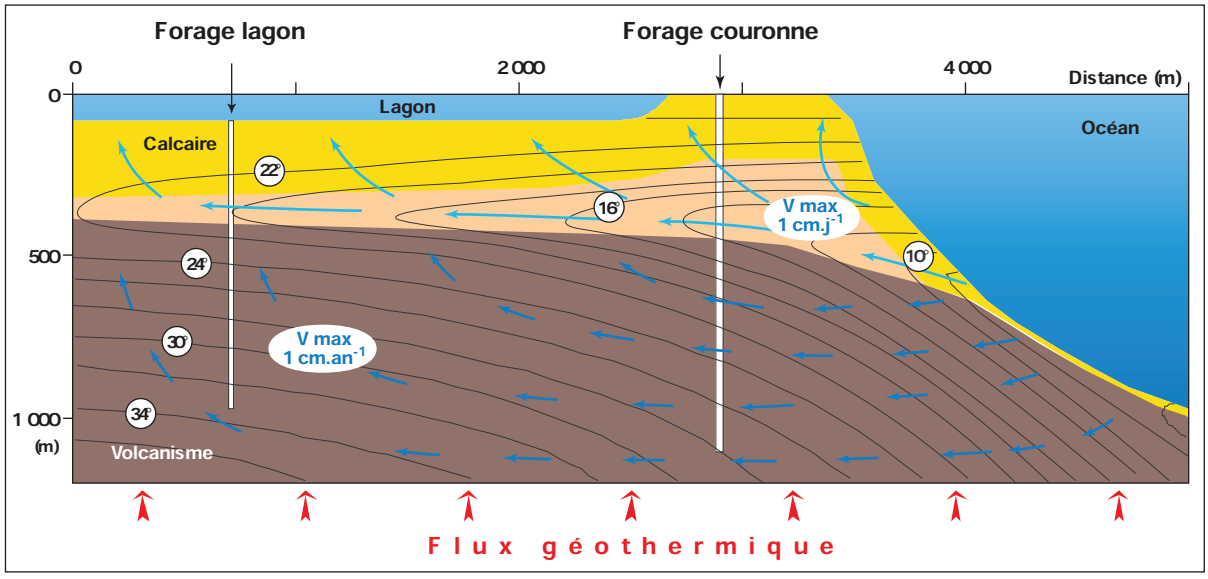


FIG. 10. - Schéma de principe des circulations naturelles dans l'atoll de Mururoa. Des mesures de température (°Celsius) et de perméabilité ont été réalisées dans de nombreux forages. Les vitesses de circulation des eaux souterraines dans le massif, déduites de ces mesures par modélisation numérique, présentent un fort contraste entre les formations carbonatées (jaunes et beiges), perméables, et les formations volcaniques (sombres), dont la perméabilité est faible.

La vitesse naturelle de circulation de l'eau est directement liée à la perméabilité des formations géologiques. Ainsi, la perméabilité relativement élevée des formations carbonatées, qui couronnent les atolls de Mururoa et de Fangataufa, autorise une vitesse de circulation suffisante pour induire un refroidissement significatif à la base de ces formations ; la perméabilité beaucoup plus faible des terrains volcaniques y limite les vitesses de circulation naturelle à des valeurs beaucoup plus faibles.

La modélisation des échanges thermiques, entre le massif et l'océan, a permis de calculer la température et les écoulements en régime permanent, en tout point de l'atoll (Fig. 10). Les températures calculées à l'intérieur de l'atoll sont en accord avec les températures mesurées dans les forages.

La perméabilité des roches communément rencontrées sur la planète varie de 10^{-3} m.s^{-1} pour un sable à 10^{-13} m.s^{-1} pour des argiles franches. La limite entre roches perméables et imperméables est classiquement fixée à 10^{-9} m.s^{-1}. Les formations volcaniques de Mururoa et de Fangataufa se situent dans la gamme des perméabilités faibles à très faibles (valeurs inférieures à 10^{-5} m.s^{-1}), avec une valeur moyenne de l'ordre de 10^{-7} m.s^{-1} à l'échelle du massif. À l'échelle locale, les formations carbonatées présentent des perméabilités très contrastées. À l'échelle du massif, un réseau d'horizons et de discontinuités à forte perméabilité (karsts) confère aux formations carbonatées une perméabilité moyenne à forte (valeurs supérieures à 10^{-5} m.s^{-1}).

I.3.3 - CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Avant la mise en activité du CEP, des missions de prospection avaient précisé les conditions météorologiques régnant dans le Pacifique Sud, en particulier autour de Mururoa.

I.3.3.1 - CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE DANS LE PACIFIQUE SUD

Dans le Pacifique Sud, la circulation dans les basses couches de l'atmosphère est dominée par la ceinture des hautes pressions tropicales australes, axée sur 30° de latitude Sud. Le climat de la Polynésie française se trouve sous le contrôle des deux cellules de l'anticyclone permanent de l'île de Pâques (centré en 28° S et 110° W) et de l'anticyclone mobile des îles Kermadec (30° S et entre 150 et 180° W).

La circulation générale dans les zones à basses pressions qui règnent de part et d'autre de cette ceinture, se distingue par :

- au nord, les alizés soufflant de l'est vers l'ouest. Des perturbations tropicales comme celles qui prennent naissance au voisinage de la Zone de convergence intertropicale (ZCIT) peuvent apparaître entre les alizés de l'hémisphère Nord et ceux de l'hémisphère Sud et évoluer en cyclones tropicaux ;
- au sud, la frange septentrionale de la grande circulation planétaire polaire australe dirigée d'ouest en est, transporte les perturbations extra-tropicales de l'hémisphère Sud. Elle peut recevoir et transformer des perturbations tropicales qui ont pu passer entre les deux cellules de hautes pressions.

En Polynésie française, la fréquence des alizés est supérieure à 70 %. Les vents d'ouest sont peu fréquents, sauf dans les îles Australes, plus au sud, donc plus proches de la circulation d'ouest, où leur fréquence atteint jusqu'à 40 % sur l'île de Rapa, située dans l'extrême sud de cet archipel.

I.3.3.2 - CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EN POLYNÉSIE FRANÇAISE

La Polynésie française bénéficie dans l'ensemble d'un climat chaud et humide, de type tropical océanique, avec pour les Tuamotu une saison des pluies, chaude, de décembre à mars, et une saison sèche, fraîche, de juin à octobre. Les atolls de Mururoa et Fangataufa jouissent d'un ensoleillement important de près de 2 700 heures par an. Les températures mensuelles varient entre 22 et 27 °C. La pluviométrie s'évalue à environ 1,3 m par an et l'hygrométrie moyenne se situe aux alentours de 80 %, ce qui est particulièrement contraignant pour les équipements de haute technologie. Dans les couches basses de l'atmosphère, les vents d'est, ou alizés, dominent la plupart du temps, au nord de la Polynésie ; alors qu'à la frange Sud, aux îles Australes par exemple, ce sont plutôt les vents du sud-ouest, plus frais.

INFRASTRUCTURES MÉTÉOROLOGIQUES

Dès 1964, des moyens importants d'observation météorologique ont été mis en place afin d'améliorer les prévisions météorologiques nécessaires à la réalisation des essais atmosphériques.

À partir de 1966, à terre, les moyens de prévision météorologique s'appuyaient sur les stations du réseau de l'aéronautique civile (Papeete à Tahiti, Atuona à Hiva Oa, Bora Bora, Mopelia, Takaroa, Tubuai, Hereheretue), de la station automatique de Rangiroa, des stations auxiliaires de Makatea, Taiohae à Nuku Hiva, Ururoa à Raiatea, Rurutu, Rimatara et du réseau des stations du Centre d'expérimentation du Pacifique installées à Tureia, Hao, Rapa, îles Gambier, Puka Puka, Reao, Hikueru, ainsi que les stations automatiques de Matureivavao et Marutea Sud.

En mer, lors de la phase de préparation d'un essai, trois aviso-escorteurs étaient utilisés comme «piquets météo», positionnés à une centaine de nautiques des sites entre les 21° et 28° de latitude Sud et entre les 130° et 155° de longitude Ouest. La mise en place de ces bâtiments, 2 à 6 jours avant l'essai, était nécessaire pour établir des prévisions à plus de 24 heures. Tous les moyens maritimes non spécialisés mettaient également à profit leurs missions pour fournir des données météorologiques complémentaires.

Des moyens aériens dédiés, deux avions, un C135 F et un DC6 météo doté d'un radar *doppler*, participaient aux observations météorologiques. Les moyens aériens associés à d'autres missions donnaient régulièrement des observations météorologiques au cours de leurs déplacements (vent estimé, renseignements concernant la couverture nuageuse). Le dispositif d'observation aérien était complété par l'exploitation des 8 à 10 images satellitaires réceptionnées par la station météorologique de Papeete-Faaa les jours précédant la réalisation de l'essai.

L'exploitation de l'ensemble des observations recueillies était assurée par :

- le centre d'analyse installé à bord du croiseur *De Grasse* ;
- le centre d'analyse du service météorologique de l'aviation civile de Faaa (prévisions générales sur la Polynésie française et protection des lignes aériennes) ;
- le centre secondaire de Hao (protection aérienne des aéronefs au départ de Hao).

Ces données permettaient l'élaboration de cartes de prévision météorologique en Polynésie française, notamment pour la région des essais (échelles 1/9 000 000 et 1/12 500 000) et servaient au calcul des prévisions, en date et lieu, des principales retombées radioactives, en fonction de la puissance attendue de l'explosion de l'engin expérimenté (cf. Chapitre VI).

Les services de la météorologie de la Direction des centres d'expérimentations nucléaires (Dircen) en Polynésie comprenaient environ 270 personnes.

I.3.3.3 - PERTURBATIONS ATMOSPHÉRIQUES EN POLYNÉSIE

Dans les basses couches de l'atmosphère, les invasions de masses d'air polaires, plus ou moins affaiblies, viennent du sud-ouest. Au nord, leur limite se trouve marquée par un front, plus ou moins actif, orienté nord-ouest/sud-est, dont la position exacte dépend de la saison. Passant entre les deux cellules de hautes pressions de l'île de Pâques et des îles Kermadec, cette limite, appelée Zone de convergence du Pacifique Sud (ZCPS), s'oriente approximativement suivant une ligne Samoa-Cook-Tuamotu-Gambier pendant la saison froide (juillet-août).

À leur arrivée en Polynésie, derrière la ZCPS, les masses d'air froid se partagent en deux branches. L'une, à l'est du méridien 140° W, converge dans la circulation d'ouest en est de l'hémisphère Sud, sur la face Sud de l'anticyclone de l'île de Pâques. L'autre, à l'Ouest du méridien 140° W, tourne autour de la cellule des îles Kermadec et se dirige progressivement vers le nord-ouest où elle converge avec l'alizé (Fig. 11a). En saison chaude, les perturbations polaires dépassent rarement les Australes. En revanche, des perturbations tropicales venant du nord peuvent passer entre les deux cellules de hautes pressions et affecter l'archipel des Tuamotu (Fig. 11b). Durant l'hiver austral, la ZCPS se trouve au voisinage des atolls de Mururoa et Fangataufa, sous la forme d'un axe perturbé de forte nébulosité. Les conditions météorologiques, température et hygrométrie élevées, y sont plus changeantes qu'aux latitudes subéquatoriales.

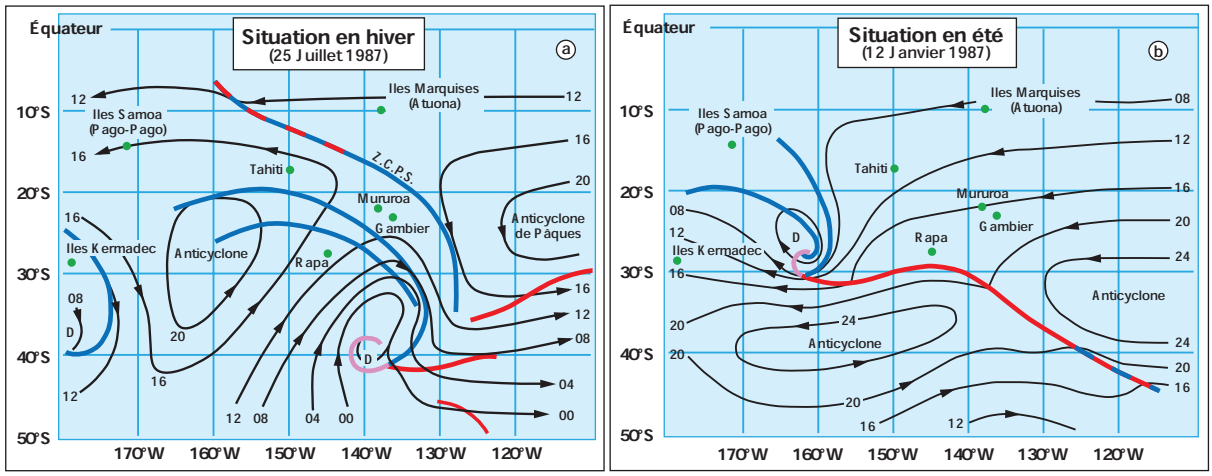


FIG. 11. - Exemples de situations météorologiques hivernale et estivale.
a : en hiver austral (25 juillet 1987, à 14 heures), on observe une perturbation d'origine polaire dont le front se trouve au voisinage de Mururoa ;
b : en été austral (12 janvier 1987 à 14 heures), on note la formation d'une dépression tropicale (D).
La pression est indiquée par les dizaines, en millibars (exemple 12 correspond à 1012 millibars).

Les atolls de Mururoa et Fangataufa ne sont pas à l'abri des cyclones et des dépressions tropicales. Les statistiques d'observation de cyclones, sur près d'un siècle, montrent que la Polynésie française est restée presque 50 ans sans avoir été touchée par un seul cyclone. Mais, entre 1980 et 1991, la fréquence passe à cinq cyclones sur deux ans, dont aucun n'a touché directement les atolls d'expérimentations.

L'apparition des cyclones découle d'un phénomène épisodique appelé *El Niño*, dû aux échanges de chaleur entre les masses océaniques et l'atmosphère. Durant les années 1980, des anomalies saisonnières de température ont été mesurées, en particulier au niveau du Sud-Ouest Pacifique. Elles sont à l'origine de perturbations dans le cycle des moussons de l'Inde et de l'Asie du Sud-Est ainsi que du passage de cyclones en Polynésie française (Fig. 12).

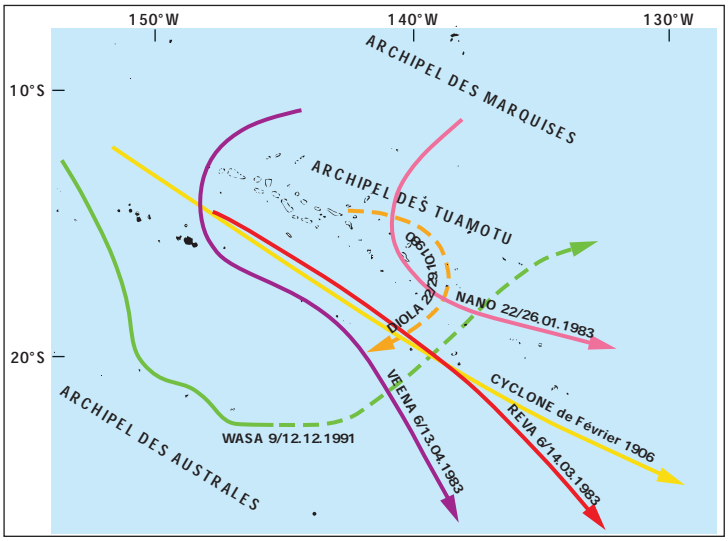


FIG. 12. - Trajectoires des cyclones ayant traversé la Polynésie française depuis 1900.

I.3.3.4 - CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES À MURUROA ET FANGATAUFA

À Mururoa et Fangataufa, les alizés de secteur est prédominent au sol, en toutes saisons, avec des vitesses dépassant rarement 40 km.h^{-1} (Fig.13). La rencontre des vents d'est et de sud-ouest s'effectue dans la ZCPS. La position de cette zone de convergence évolue au gré des saisons et, durant l'hiver austral, englobe les atolls de Mururoa et Fangataufa.

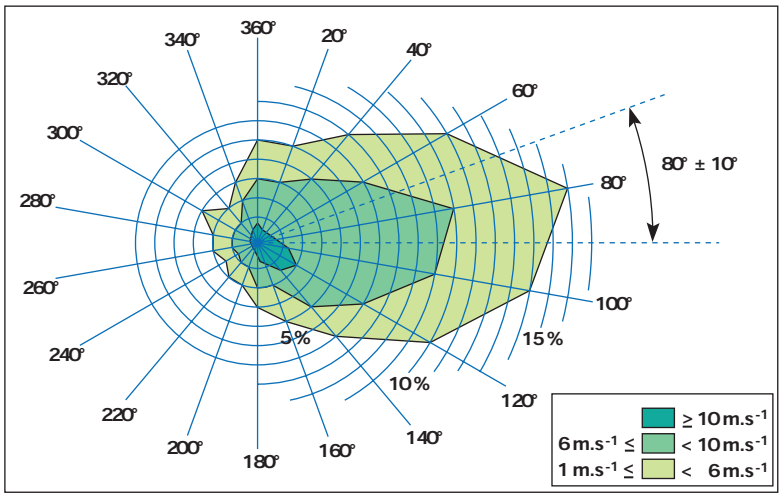
En revanche, à quelques kilomètres d'altitude, les vents sont plutôt de secteur ouest, comme sur l'ensemble de la Polynésie, avec des vitesses pouvant atteindre 200 km.h^{-1}.

Les types de temps observés localement résultent naturellement de la circulation et de la nature de masses d'air dont les caractéristiques (température, humidité) dépendent principalement de leur origine et des échanges thermiques. Dans le cas présent, où la surface est essentiellement océanique, les transferts de chaleur par évaporation-condensation jouent un rôle de premier plan. Quatre régimes de temps sont distingués sur les atolls de Mururoa et Fangataufa.

Régime d'alizés

Le régime d'alizés prédomine toute l'année au nord du 20^{e} parallèle, et s'étend souvent, en saison chaude, à toute la Polynésie. En raison de la faiblesse isobarique locale, l'alizé austral, ordinairement de sud-est, y prend une composante dominante de nord-est sur la face Nord-Ouest de l'anticyclone de Pâques. Le temps qui en résulte est chaud et ensoleillé, avec vent modéré et possibilité d'averses le plus souvent faibles et isolées, mais quelquefois plus importantes. Ces averses sont surveillées en même temps que l'activité locale de la ZCIT, car elles peuvent donner exceptionnellement naissance à une perturbation tropicale pouvant évoluer en cyclone.

FIG. 13. - Rose des vents de l'atoll de Mururoa à partir de mesures au sol. Les vents très faibles (< 1 $m.s^{-1}$), peu fréquents (< 5 %), ne sont pas pris en compte. Les directions sont graduées tous les 20° et l'intervalle entre deux cercles concentriques correspond à une fréquence annuelle de 1 % (306 jours en temps cumulé). Par exemple, les vents soufflant du secteur 80 ± 10° E ont une fréquence de 16 %, c'est-à-dire qu'ils soufflent pendant environ 58 jours par an, en heures cumulées. La vitesse V des vents est telle que : $V \geq 10$ $m.s^{-1}$ pendant 3,5 jours par an (fréquence 1 %) ; 10 $m.s^{-1} > V \geq 6$ $m.s^{-1}$ pendant 33 jours par an (9 % du temps) ; 6 $m.s^{-1} > V \geq 1$ $m.s^{-1}$ pendant 22 jours par an (6% du temps) *(Données Météorologie nationale, France)*.



Régime dépressionnaire de nord-ouest

Le régime dépressionnaire de nord-ouest correspond à la face Nord d'une dépression évoluant dans la ZCPS, le plus souvent en saison chaude entre 15 et 30° S. Le temps y est lourd, chaud et très humide, avec une nébulosité souvent forte à tous niveaux : pluies, averses, grains et rafales de vent d'ouest à nord-ouest pouvant atteindre 50 à 70 $km.h^{-1}$.

Régime dépressionnaire de sud-est

Le régime dépressionnaire de sud-est, associé et succédant au précédent, correspond à la face Sud d'une dépression évoluant dans la ZCPS. Le temps associé est moins lourd, moins chaud et moins humide que dans le cas précédent, surtout en hiver austral avec une nébulosité variable due à des nuages convectifs, avec encore quelques averses et des vents assez forts d'est à sud-est et sud.

Régime de sud-est (*Maraamu*)

Dénommé quelquefois à tort régime d'alizé de sud-est, le régime de sud-est, dit du *maraamu*, accompagne le renforcement épisodique dans les basses couches de l'anticyclone de Kermadec par une expulsion d'air polaire, à l'arrière et au-delà de la ZCPS décalée vers le nord. Assez fréquent en saison fraîche au sud du 20^{e} parallèle, ce régime peut s'étendre vers le nord jusqu'au 15^{e} parallèle. Lui correspond un temps frais et sec, avec une nébulosité plutôt faible et des précipitations insignifiantes. Les vents de sud-est peuvent souffler pendant plusieurs jours consécutifs à des vitesses de 40 à 50 $km.h^{-1}$.

I.3.4 - OCÉANOGRAPHIE

I.3.4.1 - COURANTOLOGIE DU PACIFIQUE SUD

Les courants marins des masses d'eaux de surface en Polynésie française sont organisés à peu près comme les vents des basses couches de l'atmosphère, principalement autour d'une cellule anticyclonique quasi-permanente centrée sur l'île de Pâques et tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (Fig. 14).

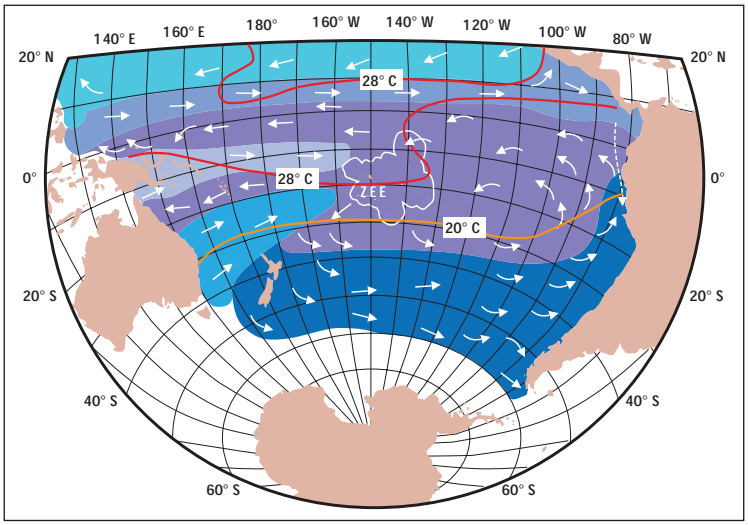


FIG. 14. - Circulation simplifiée des eaux de surface dans l'océan Pacifique Sud. La Zone économique exclusive (ZEE) de Polynésie française est délimitée.

La cellule de l'île de Pâques est bordée, au nord, par le Courant équatorial sud (CES), dirigé vers l'ouest : les eaux ainsi déplacées s'accumulent dans la zone mélanésienne. Leur reflux alimente, en partie, un courant situé au nord de l'équateur qui intéresse peu l'environnement polynésien, et le Contre-courant équatorial sud (CCES). Au sud de la Polynésie, à la convergence de ce CCES, du CES venant de Polynésie et du Courant tasmanien, les eaux s'organisent en un courant chaud, dirigé vers le sud-est, qui renforce vers l'est la branche sud de la cellule anticyclonique. Au-delà de 35° S, au niveau de la convergence subtropicale, ce courant chaud rejoint le grand courant froid circum-antarctique orienté vers l'est. Les eaux s'écoulent alors vers l'Amérique du Sud, en un courant froid, où elles remontent le long des côtes en se réchauffant progressivement.

I.3.4.2 - COURANTOLOGIE DES LAGONS

La circulation des eaux dans le lagon d'un atoll est influencée par trois principaux facteurs : le vent, la marée et la houle.

Par le frottement qu'il exerce sur la surface de l'eau, le vent peut être considéré comme le principal facteur responsable de la circulation des eaux superficielles du lagon. Il tend à provoquer l'accumulation des eaux vers la côte «au vent», créant une élévation du niveau. Sur la rive opposée dite «sous le vent», au contraire, l'eau se retire entraînant une baisse du niveau. Bien que ces élévations soient très faibles pour des alizés moyens, de l'ordre de quelques centimètres, elles s'avèrent suffisantes pour générer, en sub-surface, un courant de compensation, ou de retour, de direction opposée à celle du déplacement des eaux de surface.

D'une manière générale, les résultats des mesures de salinité, de température et de vitesse et direction des courants des deux lagons montrent une structure verticale des eaux à plusieurs niveaux :

- une couche superficielle d'épaisseur variable (jusqu'à vingt mètres), où la force d'entraînement du vent génère un courant de dérive de même sens (cette couche est dite d'Ekman) ;
- une deuxième couche de retour, où le courant est de direction opposée à celle du courant de la couche superficielle ;
- éventuellement, une troisième couche, visible le long de la côte sous le vent, avec des eaux plongeant, soit le long de la côte, soit le long des isobathes (Fig. 15).

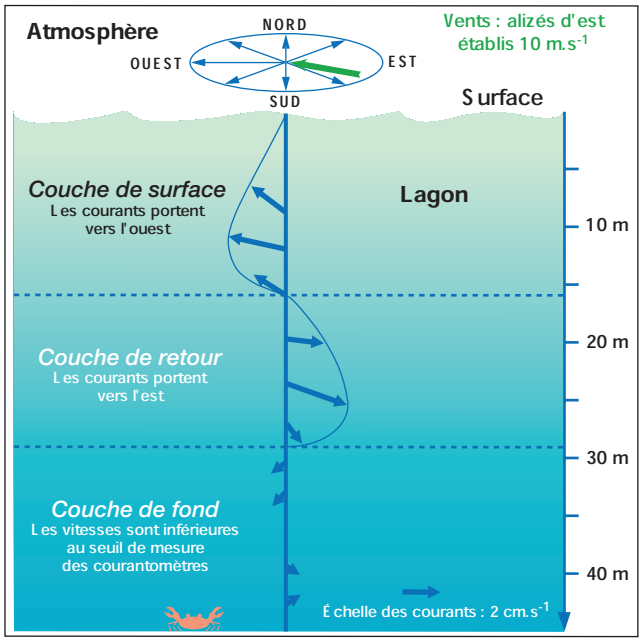


FIG. 15. - Mesures de courants du lagon induits par des vents d'est établis, dans le lagon de l'atoll de Fangataufa, mettant en évidence la stratification selon la profondeur.

La force de Coriolis dévie la masse d'eau de la couche superficielle vers la gauche d'un angle théorique de 30° à la latitude de 22° S. À Mururoa, du fait de la couronne corallienne circulaire, les courants s'organisent en un ou plusieurs grands tourbillons, variables selon les conditions de vent ou la phase de la marée. La vitesse du courant à la surface du lagon est de l'ordre de 2 % de celle du vent. Pour un vent moyen de 6 $m.s^{-1}$, on observe des vitesses du courant en surface d'environ 12 $cm.s^{-1}$. La vitesse du courant dans la partie supérieure de la deuxième couche est du même ordre de grandeur, puis diminue notablement avec la profondeur. La vitesse de la couche de fond est trop faible (< 2 $cm.s^{-1}$) pour être mesurable par les courantomètres classiques.

La marée agit dans le lagon, principalement par les passes, grâce aux entrées et sorties d'eau, mais y crée peu de cisaillement de courant. À marée montante, l'eau océanique pénètre à l'intérieur du lagon, plonge et se répartit dans l'ensemble de la masse d'eau profonde, créant des courants descendants le long de la pente de la passe (Fig. 16). À marée descendante, le courant est sortant et intéresse l'ensemble de la couche superficielle.

La houle, s'ajoutant à l'action de la marée, agit aussi sur les débits des *hoa*. À marée haute, les quantités d'eaux océaniques entrantes sont importantes et minimales à marée basse. Les caractéristiques physiques des eaux océaniques entrantes (température et salinité), légèrement différentes de celles des eaux du lagon, peuvent créer des courants de densité qui entraînent les eaux vers le fond et contribuent à alimenter et à moduler le courant de retour au fond.

Les mesures directes de courant et d'hydrologie (température, salinité) ont permis de comprendre les mécanismes généraux de la circulation des eaux dans les lagons et ont été utilisées comme données d'entrée d'un modèle hydrodynamique qui permet une représentation dans l'espace des champs de courant, des variations de température et de distribution des radionucléides dans les eaux (Fig. 16).

La circulation des eaux du lagon est caractérisée par :

- le temps de résidence, soit le temps mis par un volume d'eau en un point donné du lagon pour sortir par la passe (Fig. 17) ;
- le temps de renouvellement, soit la moyenne des temps de résidence pour l'ensemble du lagon.

La vitesse de renouvellement de l'eau du lagon a été évaluée à l'aide de simulations. Pour l'atoll de Mururoa, une série de simulations numériques basées sur différents paramètres (marées, tension du vent, apports provenant des *hoa*) montre que le temps de renouvellement s'échelonne de 44 jours dans les conditions estivales avec vent de sud-est de 8 $m.s^{-1}$, à 164 jours dans les conditions hivernales avec vent d'est soufflant à 5 $m.s^{-1}$. Le temps de renouvellement, en valeur moyenne toutes saisons confondues, a été estimé à environ 100 jours. Ces résultats ne s'appliquent pas aux périodes de «stress climatique» (dépressions tropicales, cyclones).

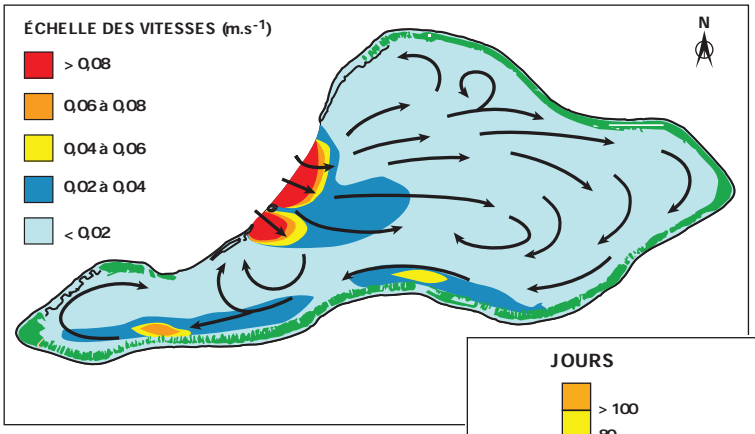


FIG. 16. - Vitesse moyenne horizontale des courants sur la colonne d'eau pour un vent d'est de 6 $m.s^{-1}$ à marée montante. (La direction des courants est donnée par l'orientation des flèches, leur vitesse par l'échelle des couleurs).

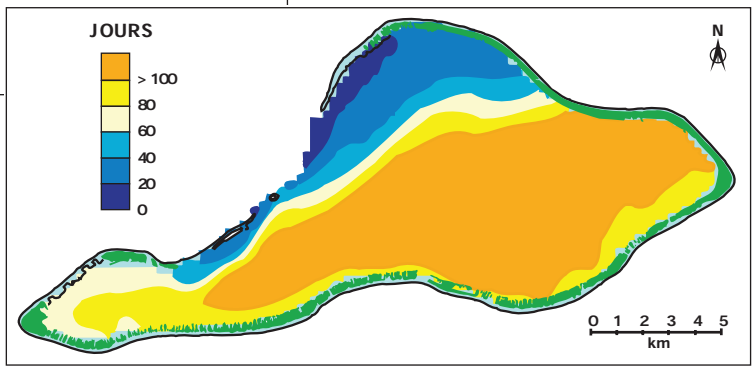


FIG. 17. - Distribution du temps de résidence intégré sur la colonne d'eau et calculé par le modèle de circulation en tenant compte de la marée et d'un vent d'est de 8 $m.s^{-1}$.

I.3.4.3 - COURANTOLOGIE À PROXIMITÉ DES ATOLLS

La modélisation de la circulation des masses d'eaux océaniques en bordure des atolls était nécessaire à la précision et au suivi de la dispersion des radionucléides initialement présents dans les eaux sortant du lagon et celles de la pente externe.

Les données de température enregistrées le long des pentes externes de l'atoll de Mururoa, jusqu'à des profondeurs de 600 m ont mis en évidence une déformation du champ thermique vertical (ondes internes) due à deux causes : la force de Coriolis et la marée. Ces ondes piégées le long du récif-barrière ont des amplitudes maximales pouvant atteindre 60 m de hauteur et sont localisées au niveau de la thermocline entre 150 et 450 m de profondeur. Elles tournent dans le sens des aiguilles d'une montre autour des atolls et génèrent des courants en profondeur parallèles à la côte, alternativement d'est, puis d'ouest, en phase avec la marée.

Les études océanographiques ont montré l'absence de remontées d'eaux profondes le long du tombant du récif (*upwelling*), en l'absence de conditions dynamiques suffisantes pour rompre la stratification thermique permanente du Pacifique tropical Sud.

I.3.4.4 - PROPRIÉTÉS DES MASSES D'EAU OCÉANIQUES

Au niveau de la convergence subtropicale, les eaux superficielles ont des caractéristiques très particulières. En effet, les eaux qui y pénètrent sont piégées, car la force de Coriolis génère une composante centripète qui tend à les accumuler vers le centre de la convergence. Ces eaux ont donc un temps de résidence important et une température élevée (22° à 29° C). Les pertes par évaporation l'emportent alors sur les apports par précipitations, en particulier dans la zone de hautes pressions, comme c'est le cas à Mururoa où la perte en eau atteint 800 mm par an. À l'est de l'archipel des Tuamotu, se trouve l'eau la plus salée et donc la plus dense du Pacifique (Fig. 18). La salinité de la couche de surface est supérieure à 36 $g.kg^{-1}$. Du fait de leur forte densité, les eaux de cette cellule tendent à plonger, empêchant toute remontée d'eaux profondes chargées en nutriments. Dans ces eaux peu renouvelées, la production phytoplanctonique tend à réduire encore la concentration des minéraux dissous. Au contraire, au nord du 8° S et au sud du 25° S de latitude, la salinité devient inférieure à 35,5 $g.kg^{-1}$ car, dans ces zones, les apports par précipitations l'emportent sur les pertes par évaporation.

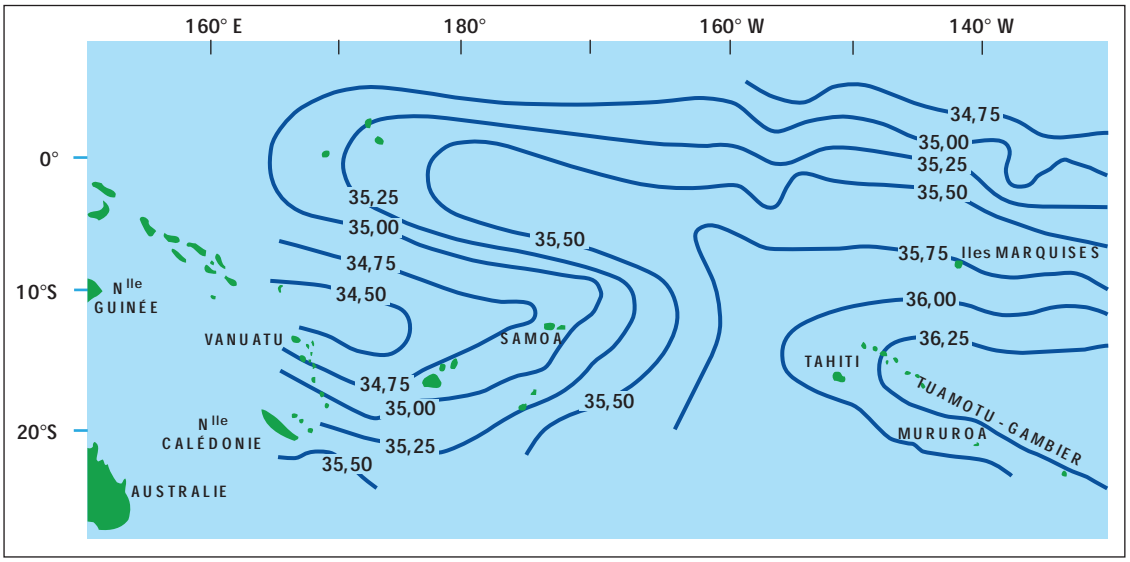


FIG. 18. - Salinité moyenne, exprimée en $g.kg^{-1}$, des eaux de surface dans l'océan Pacifique Sud, entre 1956 et 1974.

Le pH de l'eau de mer reflète l'état d'équilibre du système carbonate-gaz carbonique dissout. Il dépend de la température et de facteurs biologiques. Une eau peu productive, contenant peu de plancton et de matière organique, sera basique, avec un pH supérieur à 8,3. Entre 140 et 150° de longitude ouest, le pH augmente de 8,20 à 8,35 depuis l'équateur jusqu'au tropique du Capricorne.

La concentration en sels minéraux, nitrates, phosphates et silicates, constitue un excellent indicateur de la fertilité potentielle d'une masse d'eau, car il s'agit d'éléments indispensables à la croissance des algues et du phytoplancton. Aux mêmes longitudes, la concentration en nitrates décroît de 4 à moins de 0,2 mmoles.m^{-3} de l'équateur au tropique. Cette distribution est contrôlée par des remontées d'eaux profondes chargées en sels minéraux dans les zones équatoriales.

La concentration d'une eau en chlorophylle fournit une bonne image de son potentiel de productivité primaire (phytoplancton). Elle décroît de 0,2 mg.m^{-3} à l'équateur à moins de 0,05 mg.m^{-3} dans l'archipel des Tuamotu. Cette faible concentration en pigments chlorophylliens explique la transparence exceptionnelle des eaux océaniques polynésiennes.

I.4 - MILIEU VIVANT

Les atolls de Mururoa et Fangataufa ont fait l'objet d'un point zéro environnemental pour acquérir, avant tout essai nucléaire, les données de référence sur les peuplements des différents substrats lagonaires. De multiples études sur l'environnement biologique, tant marin que terrestre, des deux atolls ont été conduites par la suite qui ne feront ici l'objet que de brèves présentations nécessaires à la compréhension des transferts des radionucléides dans l'environnement. Le lecteur désirant plus de précisions sur les espèces polynésiennes et leur répartition au sein des différents biotopes des atolls de Mururoa et Fangataufa est invité à se reporter aux différentes publications scientifiques présentées dans la bibliographie de ce chapitre.

I.4.1 - MILIEU TERRESTRE

La colonisation d'une île nouvelle issue d'un point chaud résulte du transport par l'air (vents et oiseaux) et par l'eau (courants marins) de pollen, de graines ou de fruits flottés, mais aussi de petits arthropodes comme les araignées. L'isolement insulaire au sein du Pacifique explique la pauvreté de la biodiversité du milieu terrestre des îles polynésiennes. Pour les îles basses, le *motu* est la seule partie émergée sur laquelle la faune et la flore terrestres peuvent prospérer (Fig. 19).

Comme les autres atolls des Tuamotu du Sud, Mururoa et Fangataufa présentent une flore terrestre limitée à une centaine d'espèces, alors que le nombre d'espèces végétales présentes en Polynésie française est estimé à environ un millier.

La faune terrestre de Polynésie n'est pas plus riche que la flore, certains groupes tels que les reptiles et les mammifères y sont très peu représentés. Le nombre d'espèces d'oiseaux est faible : 112 dans les îles de la Société, 25 à Rapa et 16 à Fangataufa, à comparer aux 600 espèces dénombrées en Australie.

I.4.1.1 - FLORE

L'inventaire général de la végétation de Mururoa a été réalisé en 1966. La flore peu diversifiée des atolls de Mururoa et Fangataufa est tout à fait semblable à celle rencontrée dans les atolls voisins. Il y a une centaine d'années, les cocotiers ont été introduits sur les côtes Sud, Ouest et Est de Mururoa, où se trouvaient les *motu* de plus grande surface. Sur l'atoll de Fangataufa, la végétation est très comparable à celle de Mururoa, mais sans cocoteraie, en raison, probablement, d'un accès difficile dû à l'absence de passe naturelle.

Les végétaux se répartissent en trois strates suivant la taille des espèces (Fig. 19) : la strate arborescente qui dépasse une dizaine de mètres, la strate arbustive moyenne qui atteint une hauteur comprise entre 1 et 3 m et la strate herbacée qui ne dépasse pas un mètre.

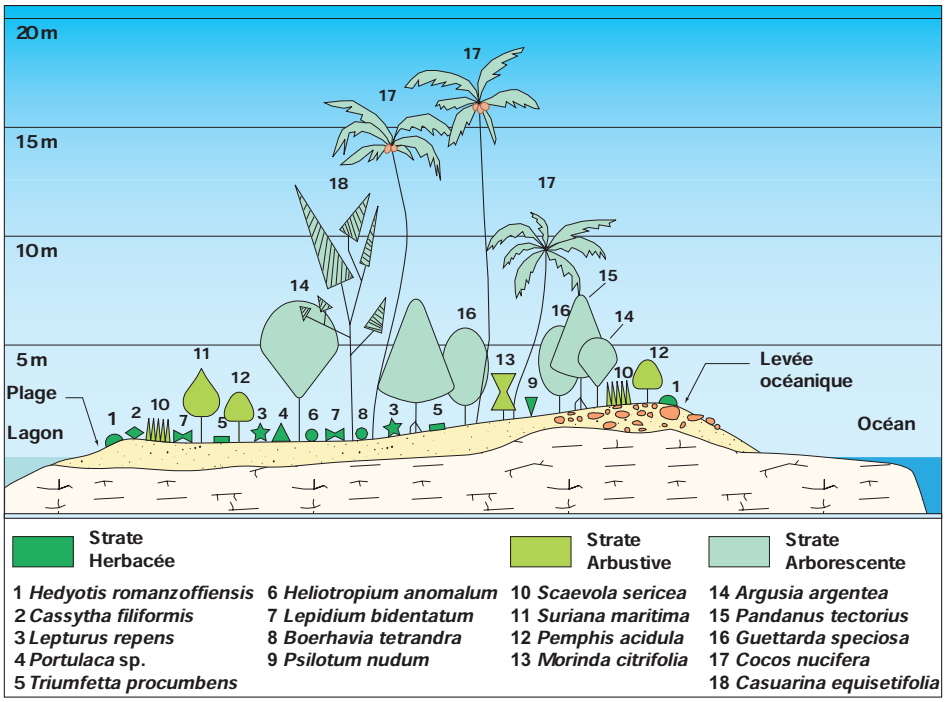


FIG. 19. - Distribution de la végétation sur une coupe schématique d'un *motu* de l'atoll de Mururoa (dessin inspiré de J. Florence, 1993).

Sur les atolls, les groupements floristiques se répartissent en fonction du substrat, fin ou grossier, composé de débris coralliens, de l'exposition aux embruns et de la proximité d'une nappe d'eau douce. Du lagon à l'océan, un groupement de *Suriana-Heliotropium* se distingue, auquel succède, dans la partie abritée du *motu*, la cocoteraie sur sol profond et à nappe phréatique proche de la surface. Côté océan, sur le substrat plus grossier, alternent la forêt de *Guettarda-Pandanus* et le groupement bas de *Scaevola-Argusia*. Enfin, sur le conglomérat de la plage prend place *Pemphis acidula* et à proximité de l'océan *Hedyotis romanzoffiensis*. *Casuarina equisetifolia* (arbre de fer ou *aito*), introduit en 1976 pour des raisons ornementales, a proliféré sur les îlots, essentiellement côté lagon.

I.4.1.2 - FAUNE

À l'image de la flore, la faune terrestre des deux atolls s'avère assez pauvre. Elle se compose d'insectes, d'oiseaux, de quelques espèces de reptiles et de petits mammifères, rats et souris.

La faune aviaire de Mururoa était peu importante à l'origine, probablement en raison du remplacement d'une grande partie de la flore polynésienne traditionnelle par des cocoteraies. À l'occasion de cinq missions réalisées entre 1965 et 1969, le Museum national d'histoire naturelle (MNHN) a dressé un inventaire permettant l'identification de 16 espèces d'oiseaux.

La richesse spécifique des peuplements d'oiseaux marins de l'atoll de Fangataufa est comparable à celle des atolls de l'archipel des Tuamotu et s'avère similaire à celle des atolls proches, Vairaatea et Tureia (Groupe Actéon, Tuamotu Sud). Les oiseaux terrestres se limitent à deux espèces : la fauvette des Tuamotu et l'aigrette sacrée. La fauvette des Tuamotu n'est connue que sur 11 îles ou atolls du sud des Tuamotu, dont Fangataufa et Mururoa.

I.4.2 - MILIEU MARIN

I.4.2.1 - ÉCOSYSTÈME PÉLAGIQUE OCÉANIQUE

Les eaux du domaine océanique polynésien sont pauvres en sels nutritifs. En effet, les eaux de surface, chaudes et salées, ne reçoivent aucun apport d'eau froide profonde. Pauvres en nutriments, elles ne sont donc pas propices au développement du phytoplancton, premier maillon de la chaîne alimentaire et donc, des autres organismes des niveaux trophiques supérieurs : zooplancton, céphalopodes et poissons. Ces derniers, entrant pour une part non négligeable dans la ration alimentaire des personnes vivant en Polynésie, ont fait l'objet d'un suivi radiologique attentif, en particulier ceux de la famille des Scombridae. Les espèces de surface côtières, sont le thazard (*Acanthocybium solandri*) et le gymnosarde (*Gymnosarda unicolor*). Les espèces hauturières comprennent de jeunes albacores (*Thunnus albacares*) et des bonites (*Katsuwonus pelamis*). Les thonidés vivant à plus grandes profondeurs se composent d'albacores adultes, patudo (*Thunnus obesus*) et germon (*Thunnus alalunga*) effectuant de grandes migrations transocéaniques (Fig. 20).

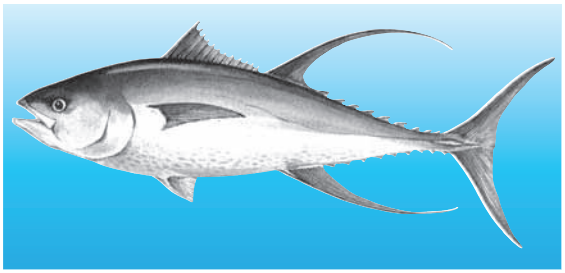
I.4.2.2 - ÉCOSYSTÈME RÉCIFAL

Dans ce «désert océanique», le milieu récifal des îles hautes et des atolls, où la productivité biologique est élevée, apparaît comme une véritable oasis de vie. Un récif corallien se présente comme une construction calcaire édifiée par des organismes vivants, principalement par des coraux et des algues calcaires.

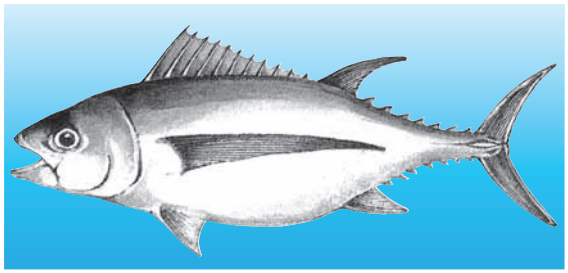
La faune marine récifale de Polynésie française n'est pas très riche, ni en espèces de madréporaires, ni en espèces de poissons et de mollusques ; certains groupes taxonomiques s'avèrent même totalement absents, comme la classe des comatules.

De l'océan vers le lagon, la zone externe océanique distingue classiquement trois structures, caractérisées par des peuplements d'organismes constructeurs différents (Fig. 4) :

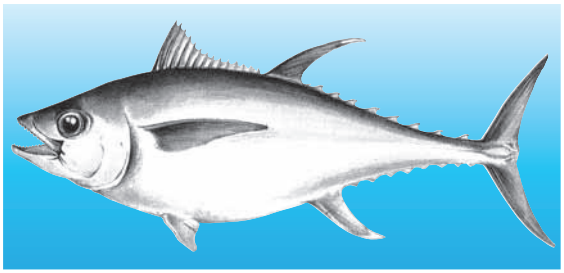
- la **pente externe** où les colonies de madréporaires des genres *Pocillopora* et *Acropora* à branches plus développées sont dominantes en surface ;
- la **crête algale** dont l'essentiel de la construction est assuré par les algues calcaires encroûtantes ;
- le **platier externe** où se retrouve sensiblement la même série des espèces caractéristiques de la pente externe jusqu'à 25 m de profondeur.



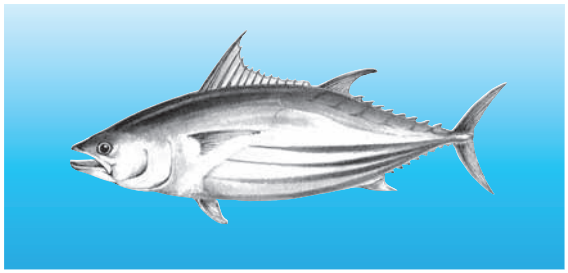
THUNNUS ALBACARES (Linné), albacore, thon jaune. **Habitat** : ensemble de la Polynésie, surtout Marquises, Tuamotu. **Biotope** : surface pour les jeunes, profondeur pour les adultes. **Taille maximum** : 150 cm, poids max. 100 kg. **Reproduction :** peu importante, Marquises.



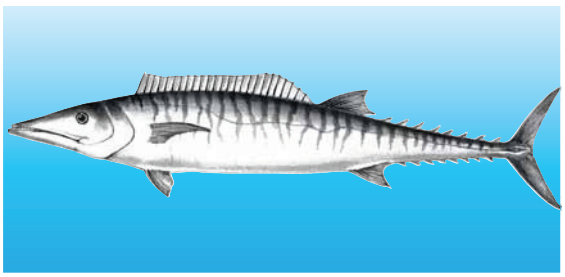
THUNNUS ALALUNGA (Bonnaterre), germon. **Habitat :** jeunes, 35-40° S (convergence subtropicale), adultes Polynésie, surtout Marquises et Tuamotu. **Biotope :** surface pour les jeunes, profondeur pour les adultes. **Taille maximum :** 120 cm, poids max. 30 kg. **Reproduction :** Tuamotu.



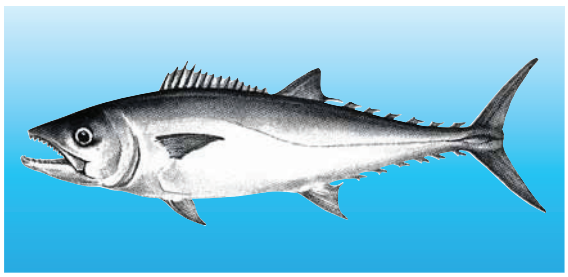
THUNNUS OBESUS (Lowe), patudo. **Habitat :** jeunes Marquises, adultes ensemble de la Polynésie et surtout Marquises. **Biotope :** surface pour les jeunes, profondeur pour les adultes. **Taille maximum :** 180 cm, poids max. 120 kg. **Reproduction :** peu importante, Marquises.



KATSUWONUS PELAMIS (Linné), bonite, listao. **Habitat :** ensemble de la Polynésie, surtout Marquises, Tuamotu-Nord. **Biotope :** surface, pélagique côtier et hauturier. **Taille maximum :** 100 cm, 20 kg. **Reproduction :** importante aux Marquises, maximum en saison chaude.



ACANTHOCYBIUM SOLANDRI (Cuvier), thazard. **Habitat :** ensemble de la Polynésie, surtout aux Tuamotu-Gambier. **Biotope :** surface, pélagique côtier. **Taille maximum :** 200 cm, 60 kg. **Reproduction :** Tuamotu-Gambier.



GYMNOSARDA UNICOLOR (Rüppell), gymnosarde, thon à dents de chien. **Habitat :** ensemble de la Polynésie, surtout aux Tuamotu-Gambier. **Biotope :** surface, pélagique côtier, pénètre parfois dans les lagons. **Taille maximum :** 160 cm, 65 kg. **Reproduction :** Tuamotu-Gambier.

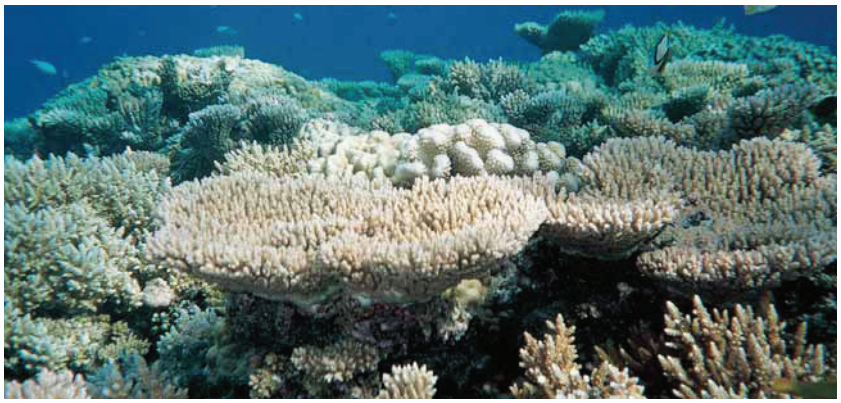
FIG. 20. - Principales espèces de grands poissons pélagiques pêchés à la traîne et à la longue-ligne, en Polynésie.

Cette répartition schématique varie en fonction de l'orientation du récif par rapport à la houle dominante. La morphologie de la côte sous le vent, où l'hydrodynamisme se trouve le plus faible, paraît quelquefois simplifiée par l'absence de véritable crête algale.

Dans les lagons, l'énergie des courants étant faible, comparée à celle du versant océanique, la flore et la faune de ces deux milieux sont différentes avec néanmoins quelques espèces communes. L'écosystème lagonaire comprend des espèces pélagiques (poissons et plancton) et des espèces benthiques dépendant fortement des deux types de substrats, durs (pinacles coralliens et platiers internes) et meubles (sédiments du fond de lagon).

Les données sur le plancton, contemporaines de l'ouverture du site de Mururoa montrent une distribution homogène dans les eaux océaniques proches de l'atoll, la tranche d'eau de 0 à 50 m présentant les plus fortes densités avec un zooplancton très diversifié où tous les groupes zoologiques sont représentés. La biomasse de ces eaux, nettement plus importante qu'au large (24 $mg.m^{-3}$), se trouve donc inférieure à celle du lagon de Mururoa qui atteint 400 $mg.m^{-3}$.

Les substrats durs se trouvent à la périphérie du lagon, sur les bordures internes et au milieu du lagon, sous forme de pinacles coralliens. À Mururoa, la végétation algale comprend essentiellement des cyanophycées et, localement, au bas de la pente, des populations importantes de l'algue brune *Padina*. Sur la bordure interne sous le vent, au sud, les colonies de madréporaires sont assez nombreuses et représentées par les genres *Acropora* et *Pocillopora*.

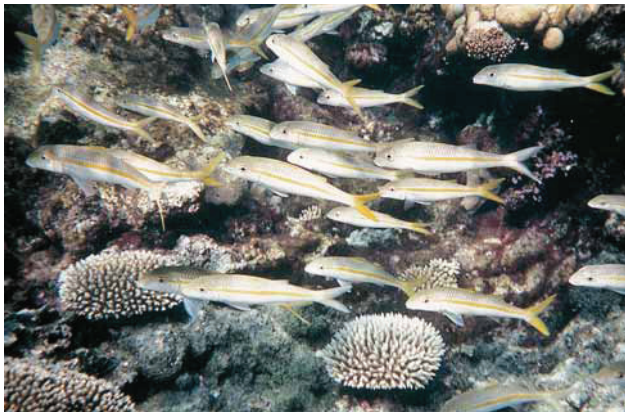


Platier interne sous le vent du secteur Sud-Est du lagon de Mururoa, avec de nombreuses colonies d'acropores branchus.

Les espèces de gastéropodes, *Littorina coccinea* et *Nerita plicata*, sont les mêmes que celles peuplant le platier externe ; s'y s'ajoutent *Drupa morum* et *Tectarius*. Les bénitiers sont assez abondants. Le tombant de la bordure interne Nord de Mururoa offre un milieu typique pour les balistes (*Rhinecanthus sp.*) auxquels s'ajoutent de nombreuses espèces de poissons sédentaires : mérous (*Epinephelus sp.*), labres (*Pseudojuloides sp.*), poissons écureuils (Holocentridae), poissons papillons (*Chaetodon sp.*), demoiselles (*Pomacentrus sp.*), chirurgiens (*Acanthurus sp.*) et perroquets (*Scarus sp.*).

La faune ichtyologique de ces bordures sous le vent s'avère beaucoup plus pauvre que dans les autres parties du lagon. Autour de quelques rochers, vivent des poissons papillons, des blennies et des poissons chirurgiens. Dans les trous de rochers, on trouve des poissons carnivores nocturnes : poissons écureuils, mérous, tétrodons et lutjans.

Sur les fonds de sable, la sole tropicale (*Bothus mancus*) très fréquente côtoie des bancs de surmulets et de mulets. Les coraux branchus abritent des poissons demoiselles (*Chromis sp.*) et bagnards (*Dascyllus aruanus*), ainsi que des poissons anges (*Centropyge flavissimus*).



Banc de surmulets (*Mulloidichthys flavolineatus*).



Poissons bagnards (*Dascyllus aruanus*) et demoiselles (*Chromis caeruleus*) inféodés à une colonie d'acropores.

La faune malacologique de Mururoa est assez riche sur les pinacles de la bordure nord au vent. Les vermets (*Dendropoma maximum*) et les bivalves *Chama iostoma*, *Arca ventricosa* et *Arca plicata* s'y avèrent relativement nombreux, surtout en endobiontes dans les blocs coralliens morts. Dans les deux atolls, l'holothurie noire (*Holothuria atra*) se trouve bien représentée à la base des pinacles. Les poissons se rassemblent en grand nombre autour des ces derniers, au milieu du lagon, habitat de tout un réseau trophique.

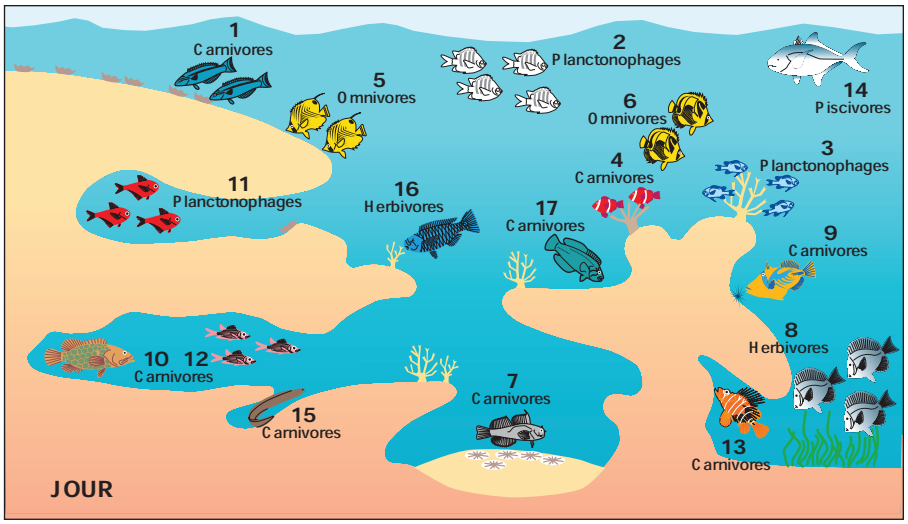


Bivalves arches (*Arca*).



Holothuries noires (*Holothuria atra*).

Les anfractuosités sont successivement occupées pendant la journée par des poissons carnivores nocturnes et la nuit par des espèces diurnes (Fig. 21). La densité des peuplements est plus élevée en surface qu'en profondeur, la richesse spécifique étant plus importante à Mururoa qu'à Fangataufa. En effet, les atolls fermés se caractérisent par la réduction de la diversité spécifique des madréporaires et des mollusques, mais les espèces étant parvenues à s'adapter y sont représentées par des populations importantes. Fangataufa, qui était un atoll fermé à l'origine, n'échappe pas à cette règle, puisque deux espèces de coraux prédominent et trois espèces de mollusques représentent, en termes d'abondance, environ 90 % des peuplements de mollusques de substrats durs.



1 : *Pseudojuloides cerasinus* (labre)
2 : *Abudefduf sexfasciatus* (poisson bagnard)
3 : *Pomacentrus pavo* (demoiselle bleue)
4 : *Amphiprion chrysopterus* (poisson clown)
5 : *Chaetodon auriga* (poisson papillon)
6 : *Chaetodon lunula* (poisson papillon)
7 : Blennidae (blennie)
8 : *Acanthurus guttatus* (chirurgien)
9 : *Rhinecanthus aculeatus* (baliste)
10 : *Epinephelus tauvina* (loche mouchetée)
11 : *Pempheris oualensis* (poisson harpe)
12 : *Neoniphon sammara* (poisson soldat)
13 : *Pterois antennata* (rascasse)
14 : *Carangoides ferdau* (carangue tachetée)
15 : *Gymnothorax javanicus* (murène javanaise)
16 : *Scarus globiceps* (perroquet masqué)
17 : *Novaculichthys taeniourus* (labre)

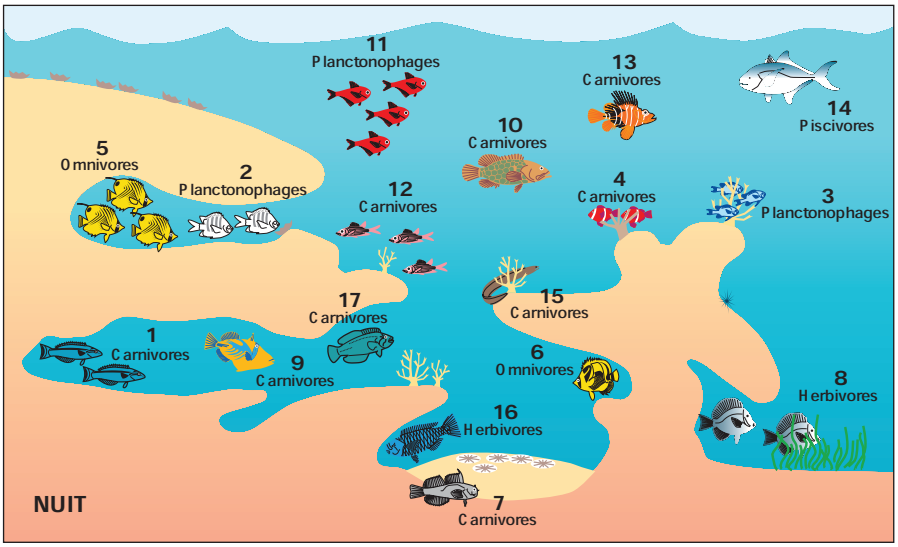


FIG. 21. - Alternance jour-nuit de la répartition des espèces de la faune ichtyologique corallienne.

Les sédiments du lagon sont organogènes, constitués de thanatocénoses coralliennes, c'est-à-dire de débris d'algues calcaires, de coraux, de foraminifères, de mollusques et d'échinodermes. Les sédiments meubles sont colonisés par une faune endogée (enfouie) et épigée (en surface). Les madréporaires demeurent peu nombreux à la surface des substrats meubles, probablement en raison d'un renouvellement insuffisant de l'eau en profondeur.

Dans le secteur Ouest du lagon de Mururoa, peu profond (< 30 m) et encombré de pinacles, le sédiment comporte de nombreux débris coralliens tout en étant parsemé de dômes à balanoglosses. Ces grands vers endogés rejettent du sédiment et des fèces hors de leur terrier, construisant ainsi un dôme d'une vingtaine de centimètres de hauteur. Parmi les autres animaux constituant l'endofaune, se trouvent des mollusques tels que *Terebra maculata* , *Terebra subulata*, *Cardium fragum* et des crustacés endogés. Dans les secteurs central et Est, les plus profonds, les substrats meubles abritent des oursins endogés (*Laganum depressum*) et des gastéropodes (*Cerithium clava*, *Conus pulicarius*). Assez clairsemées, les algueraies révèlent une algue dominante, *Caulerpa urvilliana*, qui atteint des couvertures de 500 $g.m^{-2}$, en poids frais.

À Fangataufa, la prolifération de *Caulerpa urvilliana* est due à la nature sablo-vaseuse du milieu. Les cyanophycées s'avèrent prépondérantes sur les fonds sédimentaires, autour des pinacles.



Sédiments à la base d'un pinacle corallien.



Gastéropode de l'espèce *Terebra maculata* vivant dans les sédiments

I.4.3 - RÉSEAU TROPHIQUE

Quelle que soit la biocénose considérée, cinq niveaux trophiques sont identifiés : les producteurs (végétaux), les herbivores, les carnivores, les détritivores et les décomposeurs (bactéries et autres micro-organismes) qui restituent au biotope les éléments résiduels après minéralisation (composés minéraux simples aussi appelés nutriments : phosphates, nitrates, nitrites et sels amoniacaux). À l'intérieur d'un même écosystème, les représentants de ces différents niveaux trophiques interagissent entre eux au sein de réseaux trophiques.

Il convient de garder à l'esprit le caractère simplificateur des notions de niveau et de réseau trophiques (Fig. 22). En effet, une même espèce peut appartenir à plusieurs niveaux trophiques différents : c'est le cas par exemple des espèces omnivores.

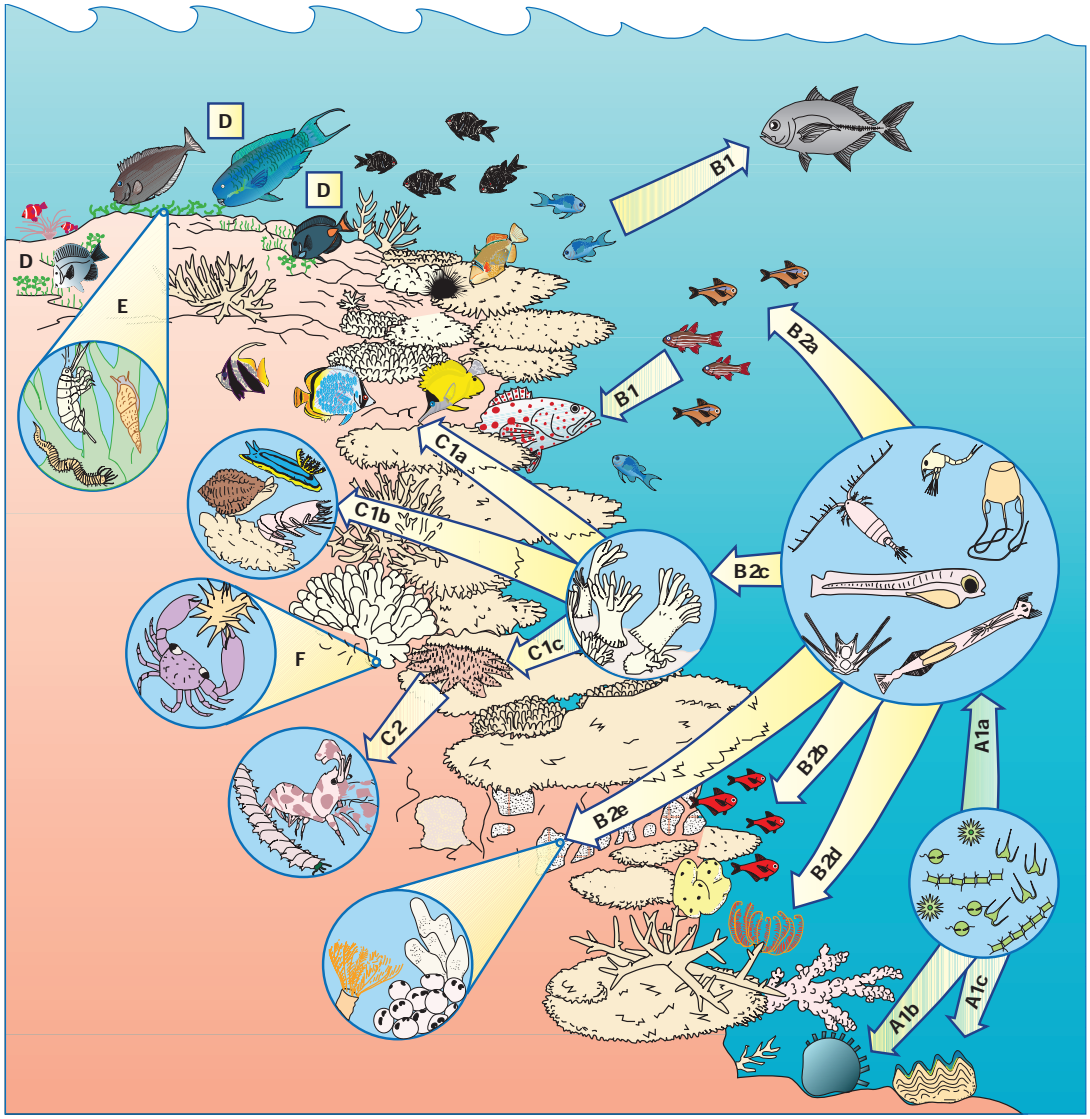


FIG. 22. - Quelques exemples de types de consommateurs et de réseaux trophiques dans une communauté récifale corallienne hypothétique (dessin inspiré de Glynn, 1988).

Le phytoplancton est consommé par le zooplancton (A1a) et par certains bivalves, par exemple (A1b, A1c). Le zooplancton est la proie, à son tour, de nombreux résidents du récif, incluant les poissons planctonivores (B2a), poissons benthiques (B2b), coraux (B2c), et animaux suspensivores présents dans les cavités du récif ou sur les surfaces exposées (B2e, B2d : consommateurs de particules flottant dans le milieu aquatique). Beaucoup d'animaux planctonivores sont la proie de piscivores (B1) et de corallivores (C1a-1c). Quelques autres chaînes trophiques sont indiquées : les herbivores (D), ingérant par prédation accidentelle la petite faune associée aux algues (E) et des animaux symbiotiques libres associés aux coraux (F).

Pour les lagons des atolls de Mururoa et de Fangataufa, les 5 grandes entités fondamentales sont présentes, à savoir :

- le niveau trophique I, ou producteurs, constitué par les végétaux marins fixés (algues supérieures du phytobenthos) ou libres (phytoplancton) ;
- le niveau trophique II composé par les animaux herbivores se nourrissant d'algues benthiques ou planctoniques du niveau précédent. Il a de nombreux représentants parmi les mollusques bivalves (bénitier, nacre perlière, chame etc.), les gastéropodes (troca, strombe etc.) et les poissons (poissons chirurgiens et perroquets) ;
- le niveau trophique III formé par les carnivores. S'y trouvent les prédateurs de la petite faune (coraux, poissons surmulets etc.) et les gros prédateurs (mérous, murènes, requins etc.) ;
- le niveau trophique IV constitué des détritivores (vers, crustacés, holothuries etc.) ;
- le niveau trophique V comprend des bactéries ainsi que des micro-organismes en suspension dans l'eau ou associés aux particules sédimentaires ; celles-ci dissolvent la matière organique tout en réalisant la minéralisation des cadavres et des déchets, permettant le recyclage des sels minéraux.

À travers les échanges alimentaires au sein du réseau trophique, les radionucléides peuvent être transmis entre les différentes espèces d'une même biocénose ou entre les biocénoses.

I.5 - PRESSIONS ANTHROPIQUES

Avant 1965, la présence humaine à Mururoa et Fangataufa était très limitée et sporadique. Les modifications anthropiques ont donc été très faibles et principalement limitées au milieu terrestre : introduction de cocotiers et de rongeurs, capture d'oiseaux. L'installation du CEP a conduit à une augmentation de la pression anthropique, due à une forte présence humaine et à la réalisation des essais nucléaires atmosphériques.

À la même époque, la plupart des îles polynésiennes ont eu, elles aussi, un développement accéléré des activités humaines et industrielles. Les recherches sur le milieu corallien et sur les conséquences écologiques de ces activités ont alors connu un essor considérable.

I.5.1 - AMÉNAGEMENTS D'INSTALLATIONS HUMAINES

Sur les sites, les activités capables de perturber l'écosystème marin ou terrestre (Fig. 23) peuvent être classées en deux catégories principales :

- des activités à caractère physique résultant d'une action mécanique sur le biotope ou de constructions diverses modifiant l'écosystème. Effectuées dans le milieu marin, elles induisent une dégradation locale des substrats, une augmentation de la turbidité et des taux de sédimentation, enfin, parfois, une modification locale de l'hydrodynamisme. Dans le milieu terrestre, elles peuvent induire un bouleversement de la flore. Par exemple, la construction de la piste d'aviation a conduit à la disparition locale de la flore naturelle ;
- des activités induisant des rejets d'effluents gazeux et liquides variés, plus ou moins bien tolérés par l'écosystème. Ces activités ont entraîné une modification de la qualité des eaux lagonaires qui, le plus souvent, limite le développement des madréporaires. Ceux-ci préfèrent plutôt les eaux claires et oligotrophes, aux eaux trop chargées en matières en suspension et en nutriments.



Le secteur Est de Mururoa.

Un double mur du côté océan et un mur simple de moindre hauteur du côté lagon ont été construits dans cette partie de l'atoll pour la protéger des plus fortes vagues. Les installations techniques liées à la mise en oeuvre des essais se situaient en bas à gauche de la photo. Les habitations, restaurants et structures de loisirs étaient répartis dans la zone boisée, à droite de la photo.

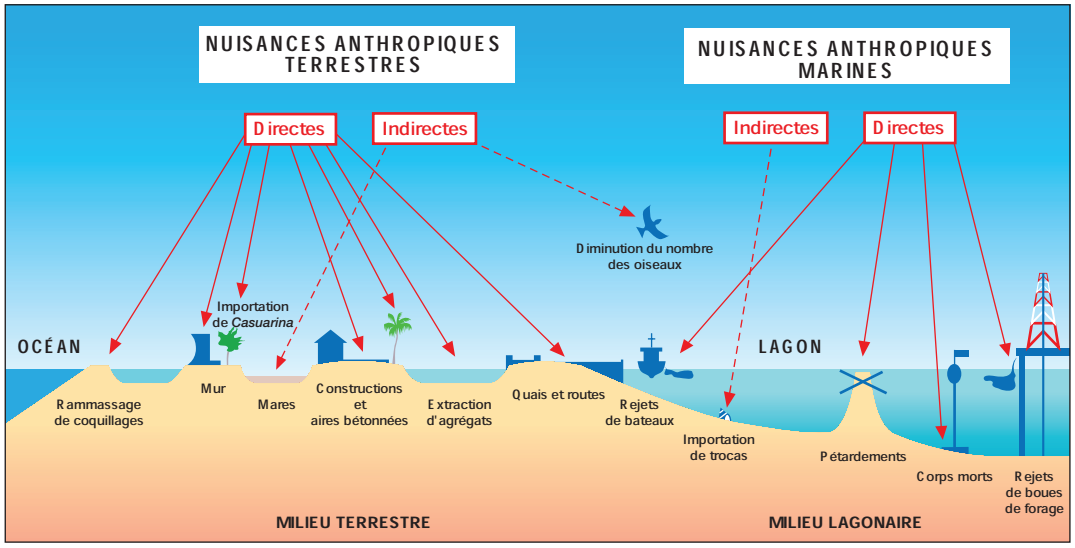


FIG. 23. Impacts sur le milieu naturel des travaux dus aux aménagements associés à la présence humaine.

I.5.2 - EFFETS DES ESSAIS

Les ondes de pression induites par les essais atmosphériques et souterrains dans le lagon ont entraîné une dégradation des substrats durs. De ce point de vue, les expériences souterraines eurent un impact plus grand du fait de leur dispersion dans le lagon et des pressions plus importantes qu'elles généraient autour des points zéro.

Le flash thermique des essais atmosphériques mégatonniques a détruit un pourcentage élevé des peuplements superficiels de coraux et de mollusques, en particulier ceux des platiers externes et de la crête algale proches des points zéro de ces essais. Le blanchissement de certaines des colonies coraliennes survivantes, par perte de leurs zooxanthelles, a été régulièrement observé jusqu'à l'arrêt des essais atmosphériques et plus sporadiquement par la suite. Ce phénomène traduisait un déséquilibre de l'écosystème comparable aux effets observés après le passage d'un cyclone tropical ou une période estivale anormalement chaude.

Quinze ans après l'arrêt des essais atmosphériques, les peuplements de poissons, de coraux des platiers externes s'étaient reconstitués, avec une diversité et un taux de recouvrement comparables à ceux existant avant les essais. La rapidité de cette restauration s'explique probablement par les faibles dégradations subies par les substrats. En 1994, les peuplements de mollusques de ces secteurs se rétablissaient à des niveaux comparables à ceux de 1966.

I.6 - CONCLUSION

En conclusion, il faut retenir des conditions naturelles des sites d'expérimentations et des atolls polynésiens que les îles de Polynésie française, de formation volcanique, sont de deux types :

- les îles hautes pouvant culminer jusqu'à plus de 2 000 m, comme celle de Tahiti, avec des vallées étroites et encaissées ; l'habitat y est situé pour l'essentiel au niveau de la ceinture littorale et les cultures maraîchères et fruitières de même que l'élevage y sont pratiquées ;
- les îles basses ou atolls, simples anneaux de corail, à fleur d'eau, avec essentiellement des plantations de cocotiers.

Les conditions météorologiques d'hiver, dans l'hémisphère Sud, sont dominées par la circulation générale des masses d'air d'ouest en est, à l'exception de la zone équatoriale où la direction dominante est d'est en ouest. En été, elle s'oriente d'est en ouest et est plus faible en général qu'en hiver, elle devient un peu plus rapide vers les basses latitudes jusqu'à l'équateur. Les atolls de l'archipel des Tuamotu sont situés dans la partie centrale d'un grand tourbillon anticyclonique où la subsidence de l'air entretient une évaporation prépondérante sur les précipitations.

Les conditions météorologiques, en particulier les directions et intensités des vents étaient fournies par un important dispositif de recueil et d'exploitation de données météorologiques qui s'appuyaient sur les experts et les réseaux de la météorologie nationale, complétés par des moyens militaires. L'ensemble de ces données météorologiques collectées sur zone permettait l'élaboration de cartes de prévision météorologique en Polynésie française et plus particulièrement dans la région des essais aux échelles 1/9 000 000 et 1/12 500 000. Elles servaient également de données de base pour réaliser les prévisions des retombées des essais atmosphériques.

Trois unités géologiques sont présentes à Mururoa et Fangataufa : les formations superficielles carbonatées et les plus profondes d'origine volcanique sont séparées, à la périphérie de la formation volcanique, par une zone de transition constituée d'un mélange de matériaux carbonatés et volcaniques.

Le volcanisme initial des atolls de Mururoa et Fangataufa a conduit à une vitesse moyenne d'empilement des laves d'environ 3 mm.an^{-1}. À Mururoa, l'homogénéité isotopique indique une composition chimique constante du manteau source durant une période supérieure à 1,2 million d'années. Le passage des basaltes aux laves évoluées s'explique par un processus de cristallisation fractionnée en système fermé. À Fangataufa, deux types basaltiques se succèdent représentant une évolution, au cours du temps, des taux de fusion partielle.

Les formations carbonatées sont composées essentiellement de matériaux détritiques, les colonies coralliennes préservées sous forme de charpentes en place sont minoritaires. La rigidité de cette partie de l'édifice est associée par la cimentation calcaire marine qui, par précipitation intense de carbonates de calcium, conduit à la formation d'une carapace rigide qui pénètre en indentation dans la masse de l'édifice.

Les conditions hydrogéologiques sont caractérisées par une vitesse de circulation de l'eau dans les formations volcaniques très faible, ne dépassant pas 1 cm.an^{-1}. Dans la couverture carbonatée, cette vitesse atteint une valeur maximale de 1 cm.jour^{-1} à l'aplomb de la couronne émergée. Globalement, la vitesse maximale en circulation de l'eau dans le massif, à l'état naturel, est de l'ordre du mètre par an.

Les caractéristiques hydrologiques des eaux océaniques sont celles d'un système à deux couches : une masse d'eau superficielle de mélange, chaude et salée, au-dessus d'une masse d'eau profonde de salinité minimale. La couche de mélange est quasiment dépourvue de nutriments. Cette forte oligotrophie de la couche euphotique se maintient à proximité immédiate des atolls.

La circulation des eaux océaniques baignant l'archipel des Tuamotu se trouve sous la dépendance du régime bi-modal d'alizés créé par le double système de hautes pressions sub-tropicales (îles de Pâques et Kermadec) qui entraîne, en zone tropicale, une dérive générale des eaux vers l'ouest. Ces eaux, très pauvres en sels nutritifs, sont l'archétype d'un milieu oligotrophe, pauvre en plancton et en poissons. Par contraste, bien que comprenant peu d'espèces, l'écosystème récifal apparaît comme une oasis au sein de ce désert marin.

La flore et la faune terrestres de l'ensemble des atolls de Polynésie sont très pauvres en espèces. L'écosystème récifal marin, malgré sa relative pauvreté comparée à l'exubérance de certains récifs de l'Indo-Pacifique, crée un pôle de vie indispensable aux populations humaines locales à travers la consommation des produits de la mer.

Aujourd'hui, la flore terrestre de Mururoa et Fangataufa, qui avait été détruite par les effets des essais atmosphériques, diffère peu de la flore originelle, tant en diversité qu'en taille. Une espèce introduite par l'Homme, le *Casuarina equisetifolia*, semble cependant aujourd'hui en pleine expansion et colonise déjà de grandes surfaces de l'atoll de Mururoa.

I.7 - BIBLIOGRAPHIE

Aspects géographiques

DOUMENGE F. & DOUMENGE J.P. Eds. (1991). - Le Pacifique, l'océan, ses rivages et ses îles. Trente ans de recherche scientifique française dans le Pacifique (1960-1990). - Coll. Fond. Singer-Polignac, 1990, Bull. Inst. Océanogr. Monaco, 509 p.

ENCYCLOPEDIE DE LA POLYNESIE 1. (1986). - Les îles océaniques. - Christian Gleizal/Multipress.

FAGES J. (1974). - Petit atlas de la Polynésie française. - Société des Océanistes.

Aspects géologiques

AISSAOUI D.M. (1988). - Magnesium calcite cements and their diagenesis : dissolution and dolomitisation, Mururoa atoll. - Sedimentology, 35, pp. 821-841.

AISSAOUI D.M., McNEILL D.F. & KIRSCHVINK J.L. (1990). - Magnetostratigraphic dating of shallow-water carbonates from Mururoa atoll, French polynesia : implications for global eustasy. - Earth Planet. Sci. Lett., 97, pp. 102-112.

AISSAOUI D.M. & KIRSCHVINK J.L. (1991). - Atoll magnetostratigraphy : calibration of their eustatic records. - Terra Nova, 3, pp. 35-40.

AKI K. & RICHARDS P.G. (1980). - Quantitative Seismology - Theory and Methods. - W. H. Freeman and Company, San Fransisco.

BARDINTZEFF J.M. (1983). - Magmatologie des atolls de Mururoa et Fangataufa (Polynésie française). - Thèse Doc. 3e cycle, Univ. Paris XI, Orsay, 267 p.

BARDINTZEFF J.M., DEMANGE J. & GACHON A. (1986). - Petrology of the volcanic bedrock of Mururoa atoll (Tuamotu archipelago, French Polynesia). - J. Vol. Geophys. Res., 28, pp. 55-83

BERBEY H. (1986). - Les épisodes carbonatés Miocène dans le volcanisme de Mururoa (Polynésie française). D.E.A., Univ. Bourgogne, 35 p.

BERBEY H. (1989). - Sédimentologie et géochimie de la transition substrat volcanique-couverture sédimentaire de l'atoll de Mururoa (Polynésie française). - Thèse Doc. Sci., Univ. Paris XI, 275 p.

BOLT B.A. (1988). - Earthquakes. - W.H. Freeman, New York.

BUIGUES D. (1982). - Sédimentation et diagenèse des formations carbonatées de l'atoll de Mururoa (Polynésie française). - Thèse Doc. 3e cycle, Univ. Paris XI, 309 p.

BUIGUES D., GACHON A. & GUILLE G. (1992). - L'atoll de Mururoa (Polynésie française) : I) structure et évolution géologique. - Bull. Soc. géol. France, 163, n° 5, pp. 645-657.

BULLEN K.E. (1980). - An Introduction to the Theory of Seismology. - Cambridge University Press, New York.

CARISTAN Y., GUILLE G & BUIGUES D. (1988). - Mururoa : du volcan à l'atoll. - Clefs CEA, n°11, pp. 40-49.

CAROFF M. (1989). - Cristallisation fractionnée de la série alcaline de Mururoa (Polynésie française) étude géochimique et modélisation. D.E.A., Univ. Bretagne Occidentale, t1 51 p. et t2 127 p.

CAROFF M. (1992). - Géochimie et pétrologie des roches volcaniques des forages d'Eiao et de Mururoa (Polynésie française) : approche des processus de genèse et d'évolution des magmas basaltiques en contexte intraplaque océanique. - Doc. Univ. Bretagne Occidentale, Brest, 392 p.

CARRIERE D. (1984). - Etude de quelques sondages carottés de l'atoll de Mururoa (Polynésie française). - D.E.A., Univ. Paris XI, Orsay, 70 p.

DESTRIGNEVILLE C. (1991). - Etudes des mécanismes d'interaction eau/roche dans l'édifice volcanique de Mururoa (Polynésie Française). - Thèse Doc., Univ. Toulouse, 163 p. et annexes.

DESTRIGNEVILLE C., SCHOTT J., CARISTAN Y. & AGRINIER P. (1991). - Evidence of an early alteration process driven by magmatic fluid in Mururoa volcano. - Earth Planet. Sci. Lett., 104, pp. 119-139.

DUPLESSIS J.C. & MOREL P. (1990). - Gros temps sur la planète (Eds O. Jacob).

DUDOIGNON P. (1988). - Altérations hydrothermales des roches volcaniques de l'atoll de Mururoa (Polynésie Française). - Thèse Doc. Sci., Univ. Poitiers, 276 p.

DUDOIGNON P., MEUNIER A., BEAUFORT D., GACHON A. & BUIGUES D. (1989). - Hydrothermal alteration at Mururoa atoll (French Polynesia). - Cham. Geol., 76, pp. 385-405.

GILLOT P.Y., CORNETTE Y. & GUILLE G. (1992). - Age (K/Ar) et conditions d'édification du soubassement volcanique de l'atoll de Mururoa (Pacifique sud). - C. R. Acad. Soi., Paris, 314, pp. 393'-399.

GUILLE G., GOUTIERE G. & SORNEIN J.F. (1993) - Les atolls de Mururoa et Fangataufa (Polynésie française). - Tome 1 - Editions Masson.

GUILLE G., MAURY R.C., BUIGUES D., BELLON H., GACHON A. & CAROFF M. (1992) - L'atoll de Mururoa (Polynésie française) : III) Conclusions générales. - Bull. Soc. géol. France, 163, n° 5, pp. 681-685.

GUILLE G., GOUTIERE G., SORNEIN J.F., BUIGUES D., GACHON A. & GUY C. (1996). - The atolls of Mururoa and Fangataufa (French Polynesia). - Geology-Petrology-Hydrogeology - From volcano to atoll. DIRCEN/CEA/Musée Océanographique Monaco Eds, 180 p.

GUILLOU H. (1990). - Le soubassement volcanique de Fangataufa : géologie, pétrologie. - Thèse Doc. Univ. Paris XI, Orsay, 301 p.

GUILLOU H., GUILLE G., BROUSSE R. & BARDINTZEFF J.M. (1990). - Evolution de basaltes tholéiitiquels vers des basaltes alcalins dans le substratum volcanique de Fangataufa (Polynésie Française). '- Bull. Soc. Géol. France, VI, n° 3, pp. 537-549.

GUY CH., SCOTT J., DESTRIGNEVILLE C. & CHIAPPINI R. (1992). - Low temperature alteration of Mururoa basalts by interstitial seawater. - Geochim. Cosmochem. Acta 56, pp. 4169-4189.

GUYOMARD T. (1990). - Sédimentation et diagenèse du sondage Echo II de l'atoll de Fangataufa (Polynésie française) : corrélations avec Mururoa. D.E.A., Univ. Paris XI, Orsay, 65 p.

JACQUET J.P. (1986). - Transition entre l'arrêt du volcanisme et l'installation du système récifal del l'atoll de Mururoa (Polynésie française). D.E.A. Univ. Bourgogne, 32 p.

JAEGER J.C. & COOK N.G.W. (1979). - Fundamentals of Rock Mechanics. - 3rd edition. Chapman and Hall, London.

LEGENDRE E. (1982). - Atoll de Mururoa (Polynésie française), forage Lagon 1 : étude de la fraction aminée de matériaux coralliens. - D.E.A., Univ. Orléans, 49 p.

MAURY R.C., CAROFF M., ACHARD S., GUILLE G., JORON J.L., GACHON A., ROCABOY A. & LETERRIER J. (1993) - L'atoll de Mururoa (Polynésie française) : II) La série magmatique. - Bull. Soc. géol. France, 163, n° 5, pp. 659-680.

MELOSH H.J. (1989). - Impact Cratering : a Geologic Process. - Oxford University Press, New-York.

PERRIN C. (1989). - Rôle des organismes dans l'édification et l'évolution de l'atoll de Mururoa (Polynésie française). - Thèse Doc. Sci., Univ. Paris XI, 301 p.

PERRIN C. (1990). - Genèse de la morphologie des atolls : le cas de Mururoa (Polynésie française). - C. R. Acad. Sci., Paris, 311, pp. 671-678.

REPELLIN P. (1975). - Contribution à l'étude pétrographique d'un récif corallien : le sondage Colette, atoll de Mururoa (Polynésie française). - Thèse Doc. Spécialité, Univ. Paris VI, 220 p.

ROCABOY A. (1987). - Apport de la géochimie isotopique et de la géochimie des éléments traces : exemple de Mururoa, Fangataufa et Gambier. - D.E.A., Univ. Clermont-Ferrand II, 102 p.

SCHIANO P. (1988). - Contribution à l'étude des îles de la Polynésie Française : le volcanisme sub-arien de Fangataufa. - D. E. A., Univ. Paris XI, Orsay, 111 p.
SCHIANO P., GUILLE G., LEOTOT C. & BROUSSE R. (1990). - Mise en évidence de cycles dans les produits volcaniques aériens et sub-aériens de l'atoll de Fangataufa (Polynésie française). - C. R. Acad. Sci., Paris, t. 311, Ser. II, pp. 1521-1527.
SEDOV L.I. (1959). - Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. - Academic Press, New-York.
SORNEIN J.F. & GUY CH. (1993). - Hydro-géochimie et circulation naturelle dans un atoll. - Chocs/CEA, 7, pp. 37-47.
TRICHET J., REPELLIN P. & OUSTRIERE P. (1984). - Stratigraphy and subsidence of the Mururoa atoll (French Polynesia). - Mar. Geol., 56, pp. 241-257.
WAGNER C., GUILLE G., CoOUILLAT J.L. & VELDE D. (1988). - Zr-rich clinopyroxenes in a comenditic trachyte from Mururoa (French Polynesia). - Bull. Miner., III, pp. 523-534.

Aspects océanographiques

ATKINSON M.J., SMITH S.V. & STROUP E.D. (1981). - Circulation in Enewetak atoll lagoon. Limnol. Oceanogr., 26, 1074-1083.
BROC D., LECLERC A.M., JEAN-BAPTISTE P. et RANCHER J. (1995). - The effect of heterogeneity on thermal convection phenomena in reefs and carbonate platforms. Congrès IAS Reefs and Carbonates platform in the Pacific and Indian Ocean, Sydney 12-16 juillet 1995. Communication.
BROWN J., COLLING A., PARK D., PHILLIPS J., ROTHERY D. & WRIGHT J. (1989). - Ocean circulation. - The Open University, Milton Keynes.
CHEVALIER J.P., DENIZOT M., MOUGIN J.L., PLESSIS Y. & SALVAT B. (1969). Etude géomorphologique et bionomique de l'atoll de Mururoa (Tuamotu). - Cahiers du Pacifique n°12 et 13, pp. 9-144.
DELEERSNIJDER E., TARTINVILLE B. and RANCHER J. (1996). - Preliminary results of a three-dimensional model of the long-term water transport in the Mururoa atoll lagoon. Workshop "Progress in Belgian Oceanographic Research" Brussels, 8-9 January 1996.
DONGUY J.R. & HENIN C. (1978). - Anomalous navifacial salinities in the tropical Pacific Ocean. - J. Mar. Res., 34 (3), pp. 355-364.
EKMAN V.W. (1905). - On the influence of the earth's rotation on ocean currents. - Ark. Mat. Astron. Fysik, 2, 1-53.
GOUT B. (1991). - Influence des apports terrigènes dans les écosystèmes lagonaires de Mayotte et de Nouvelle-Calédonie (province Indopacifique). Impact sur les peuplements benthiques. - Thèse Doctorat, Univ. Montpellier II, 252 p.
LECLERC A.M., BROC D., JEAN-BAPTISTE P. et RANCHER J. (1995). - Modélisation des circulations hydrauliques dans un atoll. Rapport CEA R 5712, 1995.
LECLERC A.M., BROC D., JEAN-BAPTISTE P. and RANCHER J. (1997). - Steady state interstitial circulations in an idealized atoll reef and tidal transients in a deep borehole by computer simulation. Special Publication – Reefs and carbonates platforms in the Pacific and Indian Ocean – Camoin and Davis Editors, p 249-258, 1997.
RANCHER J. et ROUGERIE F. (1992). - Situations océaniques du Pacifique central sud – Campagnes HYDROPOL 2 à HYDROPOL 8 du B.O.C.B. «MARARA» (d'avril 1986 à octobre 1989) - Edition SMSR, Février 1992, 86p.
RANCHER J. & ROUGERIE F. (1992). - Hydropol : situations océaniques du Pacifique central sud - Prog. conjoint CEA/DIRCEN/ORSTOM, 86 p.
RANCHER J. & ROUGERIE F. (1995). - L'environnement océanique de l'archipel des Tuamotu (Polynésie Française). - Ocean. Acta., Vol. 18, N° 1, pp. 43-60.
RANCHER J. (1995). - Etude de la circulation océanique et des caractéristiques hydrologiques et physico-chimiques de l'océan polynésien. Colloque « Environnement dans le Pacifique Sud » Paris, 28 au 31 mars 1995. Communication et poster.
RANCHER J., LAZAR A. et MAES C. (1996). - Etude numérique de la dispersion d'un traceur dans le Pacifique sud depuis l'atoll de Mururoa (Polynésie Française). Rapport CEA R- 5739, 1996.
ROUGERIE F. & WAUTHY B. (1986). - Le concept d'endo-upwelling dans le fonctionnement des atolls oasis. - Ocean. Acta, 9, pp.133-148.
ROUGERIE F. & WAUTHY B. (1993). - The endo-upwelling concept : from geothermal convection to reef construction. - Coral Reefs, 12, pp. 19-30.
ROUGERIE F. & RANCHER J. (1994). - The Polynesian South Ocean Features and Circulation, Marine Pollution bulletin, Vol. 29, N° 1-3, pp 14-25.
TALANDIER J. & BOURROUILH-LE JAN F.G. (1988). - High energy sedimentation in French Polynesia : cyclone or tsunami ? - In EL-SABH M.I. and MURTY T.S. (Eds.), Natural and Man-Made Hazards, pp. 193-199.
TARTINVILLE B., DELEERSNIJDER E. and RANCHER J. (1997). - A simple model of the tracer flux from the Mururoa lagoon toward the Pacific. Applied Mathematics letters, 1997.

Aspects biologiques

ADJEROUD M., CHANCERELLE Y. & SALVAT B. (1994). - A new bleaching event in french Polynesia during early 1994. - Proc. I.S.R.S. Cong., Luxembourg, 1994.
BABLET J.P. (1980). - Etat descriptif des pâtés coralliens de la zone Tila. - Rapp. SMCB n° 9/80, 35p.
BABLET J.P., GOUT B. & GOUTIERE G. (1995). - Les atolls de Mururoa et de Fangataufa (Polynésie Française). - III. Le milieu vivant et son évolution. DIRCEN/CEA/Masson Eds, 310 p.
BAGNIS R. (1990). - Les populations du dinoflagellé *Gambierdiscus toxicus* dans le lagon de Mururoa. - Rapp. mission, Inst. Terr. Rech. Méd. Louis Malardé, Papeete, 4 p.
BAGNIS R., GALZIN R. & BENNETT J. (1979). - Poissons de Takapoto. J. Soc. Océan., 62 (35), 69-74.
BAGNIS R., INOUE A. & PASCAL H. (1990). - Dynamique des populations du dinoflagellé *Gambierdiscus toxicus* aux îles Gambier (Polynésie française). - Proc. I.S.R.S. Cong., Nouméa, 1990, pp. 35-40.

BERGER A.J. (1987). - Avifauna of Enewetak Atoll. - The natural history of Enewetak atoll. Vol. 1 - The ecosystem : environments, biotas and processes. - U.S. Department of Energy, Washington DC, pp. 215-220.
BOUR W. (1988). - Biologie, écologie, exploitation et gestion rationnelle des trocas (*Trochus niloticus* L.) de Nouvelle-Calédonie. - Thèse Doctorat d'Etat, Univ. Montpellier II, 192 p.
BOURRET P., BINET D., HOFFSCHIR C., RIVATON J. & VELAYOUDON H. (1979). - Evaluation de «l'effet d'île» d'un atoll. Plancton et micronecton au large de Mururoa (Tuamotu). - Orstom-Nouméa, 124 p.
BROCK R.E. (1979). - An experimental study on the effects of grazing by parrotfishes and role of refuges in benthic community structure. - Mar. Biol., 51, pp. 381-388.
BROWN B.E. & HOWARD L.S. (1985). - Assessing the effects of "stress" on reef corals. - Adv. Mar. Biol., 22, pp. 1-63.
BRUSLE J., BRUSLE S. & FOURCAULT B. (1993). - Bilan sanitaire gonadique des poissons carnivores (mérous, lutjans...) des lagons de Mururoa et Hao (Polynésie française). - Rapp. mission «ciguatera» SMCB (DIRCEN), Lab. Biol. Mar., Univ. de Perpignan, 31 p.
BRUSLE J., FORGET J., LAFFOND P. & LECOMTE-FINIGER R. (1993). - Comparaison des données scalimétriques et otolithométriques de deux populations (mahoraise et polynésienne) de poissons herbivores (Acanthuridés) et carnivores (Serranidés et Lutjanidés). Leur signification écologique face au risque ciguatérique. - Rapp. Lab. Biol. Mar., Univ. de Perpignan, 54 p. + annexes.
BRUSLE J., GONZALEZ G., FOURCAULT B. & CHAUVET C. (1990). - Données histologiques et histochimiques sur les lipopigments (lipofuscines) des gonades et du foie de *Cephalopholis argus*, mérou de Polynésie française. - Proc. I.S.R.S. Cong., Nouméa, 1990, pp. 41-46.
BUDDEMEIER R.W. & FAUTIN D.G. (1993). - Coral bleaching as an adaptive mechanism. - BioScience, 43 (5), pp. 320-326.
BUDDEMEIER R.W. & SMITH S.V. (1988). - Coral reef growth in an area of rapidelly rising sea level : predictions and suggestion for long-term research. - Coral Reefs, 7, pp. 51-56.
CAYET O. (1972). - Le monde vivant des atolls, «flore terrestre". - Société des océanistes n° 28, Musée de l'Homme, Paris, pp. 109-114.
CHAVE K.E., SMITH S.V. & ROY K.J. (1972). - Carbone production by coral reefs. - Mar. Geol., 12, pp. 123-140.
CHEVALIER J.P. (1965). - Rapports SMCB (Museum I et II), Mururoa, Fangataufa, Gambier, Reao, Tureia, Marutea sud, 46 p.
CHEVALIER J.P. (1966). - Rapport SMCB (Museum III), Fangataufa, Vairaatea, Maturei Vavao, Puka Rua, Mururoa, 33 p.
CHEVALIER J.P. (1967). - Rapport SMCB (Museum IV), Mururoa, Fangataufa, 27 p.
CHEVALIER J.P. (1977). - Rapport SMCB (Museum XI), Mururoa, Fangataufa, 41p.
CONNELL J.H. (1978). - Diversity in tropical rain forests and coral reefs. - Science, 199, pp. 1302-1310.
DELESALLE B. (1985). - Mataiva atoll, Tuamotu archipelago. - Proc. 5th Int. Coral Reef Cong., Tahiti, 1985, Vol. 1, pp. 269-322.
DENIZOT M. (1968). - Rapport SMCB (Museum V), Australes, Mururoa, Fangataufa, Hao, Moorea, Bora-Bora, 53 p.
DENIZOT M. (1971). - Rapport SMCB (Museum VII), Mururoa, Fangataufa, Rangiroa, Hao, 11 p.
DENIZOT M. (1993). - Les peuplements en algues de l'atoll de Mururoa. - Rapp. SMCB, 19 p.
DONE T.J. (1987). - Simulation of the effects of *Acanthaster planci* on the population structure of massive corals in the genus *Porites* : evidence of population resilience ? - Corals Reefs, 6, pp. 75-90.
EHRHARDT J.P. (1978). - L'avifaune des Marquises. - Cahiers du Pacifique, 21, pp. 389-407.
EHRHARDT J.P. (1980). - L'avifaune de Tubuai. - Cahiers de l'Indo-Pacifique, 2, pp. 271-288.
EREZ J. (1990). - On the importance of food sources in coral-reef ecosystems. - In : Z. Dubinsky, Elsevier, Amsterdam (Ed), "Ecosystems of the world", 25, "Coral reefs", pp. 411-418.
FAURE G. (1986). - Les coraux. - In C. Gleizal/Multipress (Ed.), «Encyclopédie de la Polynésie", Vol. 3, pp. 25-40.
FAURE G. (1988). - Rapport mission à Fangataufa, SMCB - Univ. de la Réunion, 42 p.
FAURE G. (1993). - Colonisation et recolonisation corallienne sur l'atoll de Mururoa. - Rapp. mission, 14 p.
FAURE G. (1993). - Les peuplements coralliens. - In Orstom, Paris (Ed.), «Atlas de la Polynésie française", pp. 48-50.
FISHER H.I. & BALDWIN P.H. (1946). - War and the birds of Midway atoll. - The Condor, 48, pp. 3-15.
FLORENCE J. (1993). - La végétation de quelques îles de Polynésie française. - In Orstom, Paris (Ed.), «Atlas de la Polynésie française", planches 54-55.
GALLAGHER M.D. (1960). - Bird notes from Christmas Island. - Ibis, 102, pp. 489-502.
GALZIN R. (1987). - La faune ichtyologique du lagon de l'atoll de Fangataufa. - Rapp. SMCB, 30 p.
GALZIN R. (1990). - La faune ichtyologique du lagon de l'atoll de Mururoa. - Rapp. SMCB, 20 p.
GALZIN R., BAGNIS R. & BENNETT J. (1983). - Premier inventaire et distribution de la faune ichtyologique de l'atoll de Scilly (Polynésie Française). J. Soc. Océan., 77 (34), 17-28.
GALZIN R., BELL J.D. & LEFEVRE A. (1990). - Etude interannuelle du peuplement ichtyologique du lagon de l'atoll de Mataiva en Polynésie Française. Cybium, 14 (4), 313-322.
GALZIN R. & HARMELIN-VIVIEN M. (1993). - Les peuplements de poissons des récifs et des lagons - In Orstom, Paris (Ed.), «Atlas de la Polynésie française", pp. 51-53.
GALZIN R., PLANES S., DUFOUR V. & SALVAT B. (1994). - Variation in diversity of coral reef fish between French Polynesian atolls. - Coral Reefs, 13, 175-180.
GLYNN P.W. (1984). - Widespread coral mortality and the 1982-83 El Nino warming event. - Env. Cons., 11, pp. 133-146.
GONZALEZ G. (1990). - Modifications hépatiques induites chez *Serranus cabrilla* (Téléostéen) par l'ingestion de *Gambierdiscus toxicus*. - Proc. I.S.R.S. Cong., Nouméa, 1990, pp. 83-86.
GRIGG R.W. & DOLLAR S.J. (1990). - Natural and anthropogenic disturbance on coral reefs. - In : Z. Dubinsky, Elsevier, Amsterdam (Ed), "Ecosystems of the world", 25, "Coral reefs", pp. 439-452.
GRIGG R.W. & MARAGOS J.E. (1974). - Recolonization of hermatypic corals on submerged lava flows in Hawaii. - Ecology, 55, pp. 387-395.
GUZMAN K. M. (1991). - Restoration of coral reefs in Pacific Costa Rica. - Cons. Biol., 5 (2), pp. 189-195.
GUZMAN H. & HOLST I. (1993) - Effects of chronic oil-sediment pollution on the reproduction of the Caribbean reef coral *Sideastrea siderea*. - Mar. Poll. Bull., 26 (5), pp. 276-282.
HARMELIN-VIVIEN M. (1994). - The effects of storms and cyclones on coral reefs : a review. - J. Coast. Res., Special issue, 12, Coastal hazards, 211-231.
LACAN F. & MOUGIN J.L. (1974). - Les oiseaux des îles Gambier et de quelques atolls orientaux de l'archipel des Tuamotu (Océan Pacifique). - L'oiseau et la revue française d'ornithologie, 44 (3), 87 p.

LANCTÔT J.L., LEGENDRE P. & SALVAT B. (1997). - How do coral reef Gastropods feel about nuclear blasts ? A long-term study of the effects of man-made perturbations. - Ocean. Acta, 20 (1).
MARION P. (1994). - Bilan sanitaire hépatique des poissons herbivores (*Ctenochaetus striatus*) et carnivores (*Cephalopholis argus*) des lagons de Mururoa et Hao (Polynésie française). - Rapp. Lab. Biologie Marine, Univ. Perpignan, 19 p. + Ann.
MARSZALEK D.S. (1981). - Effects of sewage effluents on reef coral. - Proc. 4th Int. Coral Reefs Cong., Manila, 1981, Vol. 1, p. 213.
MARSZALEK D.S. (1987). - Sewage and eutrophication. - In "Human impacts on coral reefs : facts and recommandations" (B. Salvat Ed.), pp. 77-90.
MICHEL A. (1969). - Plancton du lagon et des abords extérieurs de l'atoll de Mururoa. - Cahiers du Pacifique, n° 12 et 13, pp. 225-276.
MOUGIN J.L. (1966). - Rapport SMCB (Museum III) : les Tuamotu et Gambier.
ODUM E.P. (1971). - Fundamentals of Ecology. - W.B. Saunders Ed., London, 3rd Ed., 574 p.
ODUM H.T. & ODUM E.P. (1955). - Trophic structure and productivity of a windward coral reef community on Eniwetok Atoll. - Ecol. Monogr., 25, pp. 291-320.
PAYRI C. & DENIZOT M. (1993). - Les peuplements d'algues. - In Orstom, Paris (Ed.), «Atlas de la Polynésie française», planche 49.
PEARSON R.G. (1981) - Recovery and recolonization of coral reefs. - Mar. Ecol. Progr. Ser., 4, pp. 105-122.
PLANES S., GALZIN R., BABLET J.P. and SALE P.F. (2005). - Stabilty of coral reef fish assemblages impacted by nuclear tests. *Ecology* : Vol. 86, n° 10, pp. 2578-2585.
POMIER M. (1969). - Mururoa, état de la cocoteraie en mars 1966. - Cahiers du Pacifique n° 12 et 13, pp. 219-223.
RENON J.P. (1993). - L'atoll de Fangataufa : étude du zooplancton du lagon et de la frange océanique voisine. - Rapp. SMCB, 58 p.
RICARD M. (1985). - Rangiroa atoll, Tuamotu archipelago. - Proc. 5th Int. Coral Reef Cong., Tahiti, 1985, Vol. 1, pp. 159-210.
RICARD M. (1990). - Le phytoplancton du lagon de Mururoa. - Rapp. SMCB, 39 p.
ROGERS C.S. (1990). - Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. - Mar. Ecol. Progr. Ser., 62, pp. 185-202.
RUSS G. R. & ALCALA A.C. (1989). - Effect of intense fishing pressure on an assemblage of coral reef fishes. - Mar. Ecol. Progr. Ser., 56, pp. 13-27.
SALVAT B. (1966). - Rapport SMCB (Museum III), Fangataufa, Vairaatea, Maturei Vavao, Puka Rua, Mururoa, 48 p.
SALVAT B. (1972). - La faune benthique du lagon de l'atoll de Réao (Tuamotu, Polynésie). - Cahiers du Pacifique, 16, pp. 31-110.
SALVAT B. (1986). - Oursins et holothuries. - In C. Gleizal/Multipress (Ed.), «Encyclopédie de la Polynésie», Vol. 3, pp. 66-68.
SALVAT B. (1987). - Peuplements de mollusques de Fangataufa (1967-1987). - Rapp. SMCB, 64 p.
SALVAT B. (1992) - Corals reefs - a challenging ecosystem for human societies. - Global Environ. Change, 1992, 2 (1), pp. 12-18.
SALVAT B., FAURE G., GALZIN R. & PAYRI C. (1993). - La biogéographie récifale et lagonaire. - In Orstom, Paris (Ed.), «Atlas de la Polynésie française", planche 53.
SALVAT B., LEGENDRE P. & LANCTÔT J.L. (1995) - Atmospheric nuclear tests : immediate and long term effects on coral reef gastropod assemblages. - Int. Conf. «Long term changes in marine ecosystems», Arcachon, France.
SALVAT B. & RENAUD-MORNANT J. (1969) - Etude écologique du macrobenthos et du méiobenthos d'un fond sableux du lagon de Mururoa (Tuamotu, Polynésie). - Cahiers du Pacifique n° 12 et 13, pp. 303-323.
SMITH S.V. (1978). - Coral reef area and contributions to processus and resources of the world's oceans. - Nature, 273, pp. 225-226.
SOURNIA A. (1977). - Analyse et bilan de la production primaire dans les récifs coralliens - Ann. Inst. Oceanogr., 53, pp. 47-74.
STEADMAN D.W. (1989). - Fossil birds and biogeography in Polynesia. - Acta XIX Cong. Int. Om., 2, pp. 1526-1534.
THIBAULT J.C., MOUGIN J.L. & LACAN F. (1993). - Les vertébrés terrestres de Fangataufa (Tuamotu, Pacifique sud) : évolution des peuplements (1965-1987). - Rapp. SMCB, 24 p.
THOMASSIN B.A., JOUIN C., RENAUD-MORNAND J., RICHARD G. & SALVAT B. (1982). - Macrofauna and meiofauna in the coral sediments on the Tiahura reef complex of Moorea island (French Polynesia). - Tethys, 10, (4). 392-397.
VAUGELAS DE J. (1980) - Etude qualitative et quantitative de la matière organique vivante et détritique de sédiments coralliens dans les îles polynésiennes de Tahiti, Moorea et Takapoto. - Thèse 3° cycle, Univ. Paris VI, 103 p.
VILLIERS L., CHRISTIEN D. & SEVERE A. (1987). - Investigations sur l'écologie des sables lagonaires biogènes de l'atoll de Mururoa (Tuamotu, Polynésie française). - Orstom, Notes et Documents, n° 36, 98 p.
YEN S. (1985). - The exploitation of troca (*Trochus niloticus* L.) in French Polynesia. - Proc. 5th Int. Coral Reef Cong., Tahiti, 1985, Vol. 5., pp. 557-561.

CHAPITRE II

Essais nucléaires et environnement

Les essais nucléaires consistaient à tester des engins conçus pour contribuer au diagnostic de bon fonctionnement des armes en cours de développement. Ils ont mis en jeu des matières nucléaires et conduit à la libération de radionucléides dans l'environnement.

Entre 1966 et 1974, la France a procédé à 41 essais d'explosion d'engin nucléaire dans l'atmosphère, dont 37 à Mururoa et 4 à Fangataufa (cf. Annexes 2 et 3). Ces essais peuvent être classés suivant trois catégories, les essais sur barge, sous ballon captif et par largage à partir d'avion. À ces essais, il convient d'ajouter 5 essais de sécurité, sans explosion nucléaire.

Par la suite, la maîtrise technique et scientifique acquise alliée au souci de réduire encore tout risque d'impact potentiel sur les populations et sur l'environnement, hors géosphère, conduisirent les expérimentateurs à procéder à des essais souterrains d'explosion nucléaire. De 1975 à 1996, 137 essais souterrains, également appelés «essais en puits» ont été réalisés, dont 127 à Mururoa et 10 à Fangataufa. Dix essais de sécurité souterrains, sans explosion nucléaire, ont également été réalisés à Mururoa.

Ce chapitre traite spécifiquement des radionucléides générés par les essais et de leurs modes de dispersion dans l'environnement. Les informations présentées se limitent à celles permettant de suivre la démarche des expérimentateurs dans leur recherche permanente de limitation des conséquences des explosions aux périmètres des sites d'expérimentations. Les notions de base sur la radioactivité et les réactions nucléaires mises en jeu lors du fonctionnement d'engins nucléaires sont présentées brièvement dans l'annexe 1 de ce document.

II.1 - RÉACTIONS NUCLÉAIRES ET RADIONUCLÉIDES

II.1.1 - RADIONUCLÉIDES LIBÉRÉS LORS DES ESSAIS NUCLÉAIRES

Les explosions nucléaires ont libéré dans l'environnement plus de 1 000 radionucléides différents, issus de cinq sources principales :

- les matières nucléaires non consommées ;
- les traceurs de réaction ;
- les produits des réactions de fission ;
- les produits des réactions d'activation des composants technologiques (engins, structures) ;
- les produits d'activation des composantes naturelles de l'environnement : eau, sol et air.

II.1.1.1 - MATIÈRES NUCLÉAIRES NON CONSOMMÉES

Lors d'une explosion nucléaire, les réactions de fission consomment de l'ordre de 10 % de la totalité de la matière fissile de l'engin testé. Aussi, les constituants nucléaires du dispositif, isotopes du plutonium (^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu), américium (^{241}Am), isotopes de l'uranium (^{235}U, ^{238}U, ^{234}U) et tritium (^{3}H) sont-ils libérés dans l'environnement.

II.1.1.2 - TRACEURS DE RÉACTION

Certains éléments étaient parfois introduits dans l'engin, en très faibles quantités, comme traceurs des réactions neutroniques. Leur contribution à l'activité totale étant négligeable, leur transfert dans l'environnement n'est pas traité dans ce document.

II.1.1.3 - PRODUITS DE FISSION

De nombreux radionucléides sont créés lors des réactions de fission de l'uranium ou du plutonium avec une probabilité de formation variable, fonction de leur nombre de masse (Fig. 24).

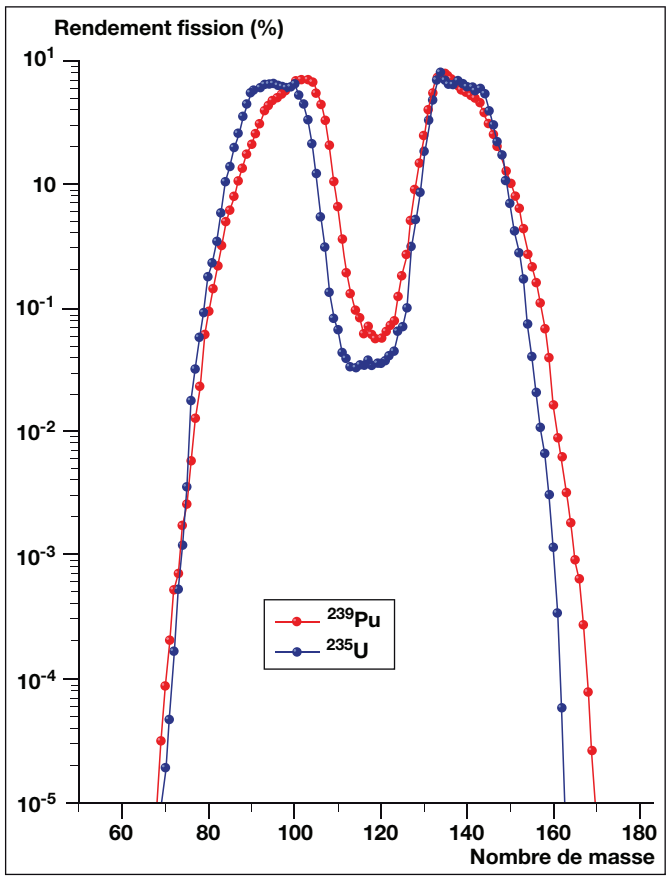


FIG. 24. - Rendement de fission (%) du ^{235}U et du ^{239}Pu pour les éléments dont le nombre de masse est compris entre 70 et 170.

TABLEAU 1.
Principaux produits de fission, de période supérieure à l'heure, mesurés après une expérimentation.

Radio éléments	Rendement de fission en %		Période radioactive
	^{235}U	^{239}Pu	
^{85}Kr	1,4	0,6	10,756 ans
^{87}Rb	2,5	1,0	$4,75.10^{10}$ ans
^{89}Sr	4,4	1,7	50,53 jours
^{90}Sr	5,5	2,0	28,78 ans
^{91}Y	5,7	2,5	58,51 jours
^{93}Zr	6,3	3,8	$1,53.10^{6}$ ans
^{95}Zr	6,4	4,7	64,02 jours
^{99}Mo	5,9	6,0	65,94 heures
^{103}Ru	3,2	6,8	39,26 jours
^{106}Ru	0,5	4,4	373,59 jours
^{129m}Te	0,8	1,5	33,6 jours
^{129}I	0,8	1,5	$1,57.10^{6}$ ans
^{131}I	3,2	3,9	8,02 jours
^{133}I	6,7	7,0	20,8 heures
^{133}Xe	6,7	7,0	5,24 jours
^{135}Xe	6,6	7,6	9,14 heures
^{137}Cs	6,2	6,6	30,07 ans
^{140}Ba	6,0	5,3	12,75 jours
^{141}Ce	5,9	5,1	32,50 jours
^{144}Ce	5,3	3,7	284,89 jours
^{147}Nd	2,1	2,0	10,98 jours
^{147}Sm	2,1	2,0	$1,06.10^{11}$ ans
^{151}Sm	0,4	0,8	90 ans

Ces produits de fission sont radioactifs. Ils vont se transformer à la suite de désintégrations radioactives en de nouveaux éléments (cf. Annexe 1). Ces désintégrations successives donnent naissance, par filiation isobarique, à une cascade de radionucléides dont les proportions relatives sont caractéristiques de l'essai réalisé (Tableau 1).

Ce mélange initial de produits de fission, non fractionné, est caractérisé par une activité bêta globale estimée à $1,7.10^{19}$ Bq.kt^{-1} une heure après l'explosion (H+1). Sachant que la libération d'une énergie équivalente à l'explosion de 1 kt de TNT est réalisée par la fission complète d'environ 57g de ^{239}Pu, cela représente $1,4.10^{23}$ fissions.kt^{-1}.

Ces réactions de fission aboutissaient à la formation d'un mélange de radionucléides, dans des proportions déterminées par le type d'essai, qui était libéré dans la biosphère lors des explosions atmosphériques ou confiné dans la géosphère lors des essais souterrains.

II.1.1.4 - PRODUITS D'ACTIVATION

La plupart des neutrons de fission associés au rayonnement initial étaient des neutrons rapides. Ils étaient essentiellement capturés par les noyaux des atomes de la matière nucléaire de l'engin testé, des matériaux du dispositif nécessaire à l'essai et des composantes naturelles de l'environnement proche. Ces réactions induisaient la formation d'un cortège caractéristique de produits d'activation.

Activation des constituants de l'engin et des structures

Des radionucléides étaient formés par activation, d'une part, des impuretés et des traceurs associés à la matière fissile et, d'autre part, des pièces métalliques telles que celles des gainages, du conteneur et des installations, situées à proximité immédiate de l'engin (Tableau 2). Dans les premiers jours suivant un essai, les produits de fission et d'activation étaient intimement mélangés, mais la fraction relative de l'activité due aux produits d'activation était négligeable. En revanche, les produits d'activation induits dans les installations et les structures associées à l'essai comme les barges, les nacelles et les câbles dans le cas des essais atmosphériques, sont restés des sources d'irradiation persistantes au cours du temps, en fonction de leurs périodes radioactives respectives. Ainsi, compte tenu des sections efficaces des noyaux cibles, des radionucléides comme le ^{60}Co présentaient encore un niveau d'activité décelable 20 ans après les derniers essais atmosphériques.

TABLEAU 2.
Principaux radionucléides de périodes radioactives supérieures à l'heure induits par activation neutronique des parties métalliques proches du point zéro de l'explosion.

Radioéléments induits	Période radioactive	Mode de production		
^{55}Fe	2,6 ans	^{56}Fe (n, 2n)	^{54}Fe (n, γ)	
^{59}Fe	45,5 jours	^{58}Fe (n, γ)		
^{57}Co	270 jours	^{58}Ni (n, p)	^{58}Ni (n, pn)	ou filiation ^{57}Ni
^{58}Co	71,3 jours	^{58}Ni (n, p)		
^{60}Co	5,26 ans	^{60}Ni (n, p)	^{63}Cu (n, α)	^{59}Co (n, γ)
^{65}Zn	245 jours	^{64}Zn (n, γ)		
^{54}Mn	290 jours	^{54}Fe (n, p)		
^{56}Mn	2,58 heures	^{55}Mn (n, γ)		
^{57}Ni	36 heures	^{58}Ni (n, 2n)		
^{63}Ni	93 ans	^{62}Ni (n, γ)		
^{51}Cr	27,8 jours	^{50}Cr (n, γ)		
^{108m}Ag	127 ans	^{107}Ag (n, γ)		
^{110m}Ag	250 jours	^{109}Ag (n, γ)		

Activation des composantes naturelles de l'environnement

La radioactivité induite par le flux neutronique associé au rayonnement initial concernait aussi la matière du milieu naturel proche du point d'explosion. Il s'agissait essentiellement de celle du milieu marin et du sol de l'atoll, lors des essais atmosphériques, et du sous-sol corallien ou basaltique, lors des essais souterrains. Les radionucléides produits et leurs niveaux induits dans l'environnement sont caractéristiques de chaque essai, dépendant, en particulier, du mode et des conditions de l'essai. Différentes réactions étaient observées lors d'un essai dans l'atmosphère.

- L'activité induite dans l'air par la fission est peu significative. Les réactions ^{16}O (n, p) ^{16}N avec l'oxygène conduisent à la formation de l'isotope 16 de l'azote qui disparaît rapidement, sa période étant de 7 secondes. En revanche, la réaction ^{14}N (n, p) ^{14}C avec les noyaux d'azote, crée naturellement et en permanence dans l'atmosphère du ^{14}C de 5 760 ans de période. Les essais thermonucléaires à haut flux de neutrons ont généré une production de ^{14}C qui s'est intégrée au stock naturel.
- L'activation des éléments constituant l'eau de mer par des réactions (n, γ) ou (n, p) conduit à la formation de ^{82}Br, ^{38}Cl, ^{35}S, ^{32}P et ^{24}Na, de périodes respectives 1,47 j, 37,24 min, 87,51 j, 24,28 j et 14,6 h.
- L'activation du sol corallien, mais aussi du béton, conduit essentiellement à la formation immédiate de ^{24}Na due à leur imbibition d'eau de mer, associée à la production de ^{45}Ca de 160 jours de période.

Lors des essais souterrains, les prélèvements d'échantillons dans la cavité créée par l'explosion étaient effectués quelques jours à quelques semaines après l'essai. L'activité des produits d'activation induits était alors négligeable, par rapport à celle des produits de fission. Les seules traces parfois observées étaient celles des produits d'activation présents dans l'eau de la cavité.

II.2 - TYPES D'ESSAIS ET TRANSFERTS DANS L'ENVIRONNEMENT

Les explosions nucléaires dans l'atmosphère ont libéré dans l'environnement des radionucléides qui se sont dispersés dans l'ensemble des composantes environnementales des sites. Les essais souterrains ont été conduits pour confiner la majorité des radionucléides dans le sous-sol géologique, réduisant à une fraction infinitésimale de la quantité initiale les rejets de radionucléides dans la biosphère, essentiellement sous forme de gaz radioactifs.

II.2.1 - ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES

En 1966 et 1967, quatre essais ont été effectués sur des barges ancrées dans les lagons, trois à Mururoa et un à Fangataufa. La barge supportant l'engin à tester était positionnée par des fonds d'une trentaine de mètres, entre 700 à 1 700 mètres au large d'un Poste d'enregistrement avancé (PEA). Ces essais entraînaient une forte interaction entre la boule de feu et les composantes naturelles du lagon. Ils induisaient de nombreux produits d'activation qui, associés aux produits de fission, étaient transférés aux eaux de mer, sédiments et coraux du site. Après un essai, il fallait attendre environ un mois pour que la décroissance des produits radioactifs permette le retour à une activité normale dans la zone de l'essai.

De 1966 à 1974, trente et un essais sous ballon captif ont été effectués à Mururoa et trois à Fangataufa. L'aérostat sous lequel était fixé l'engin à tester était positionné à quelques centaines de mètres d'altitude. Ce ballon était maintenu par des câbles arrimés à trois barges ancrées face à un PEA (Fig. 25). L'intérêt de ce mode d'essai était de réduire les conséquences radiologiques pour l'environnement et donc pour les populations en diminuant les retombées locales et régionales des particules les plus lourdes. En effet, en se réfléchissant sur la surface du lagon, l'onde de choc générée par l'explosion projetait les éléments radioactifs dans la haute atmosphère, où l'activité des masses d'air diminuait rapidement avec le temps par l'action de la décroissance radioactive des radionucléides produits lors de l'explosion et de leur dilution lors de leur dispersion par les vents. Le personnel pouvait donc, en général, revenir sur le site quelques heures après l'essai.

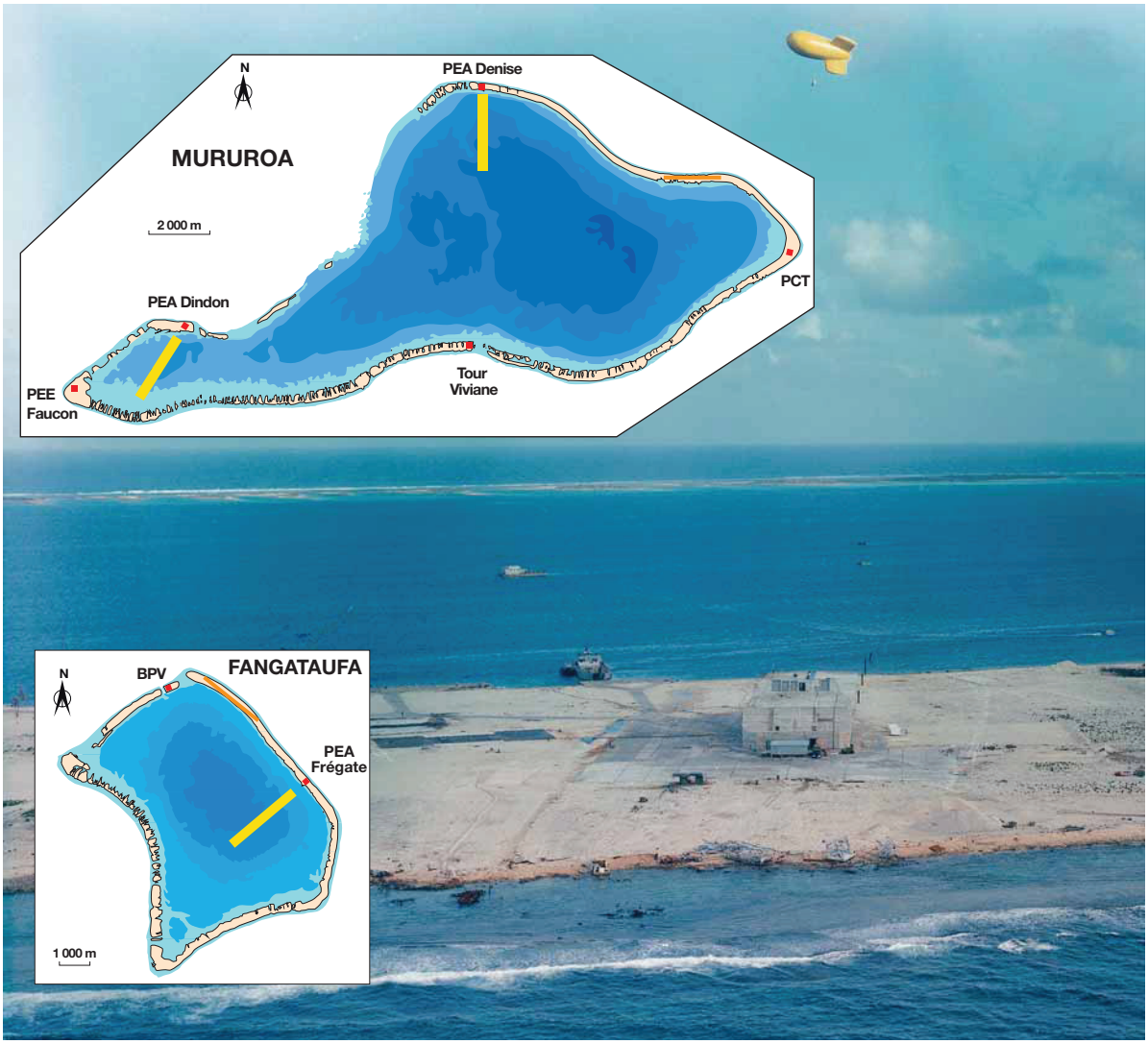


FIG. 25. - Dispositif de mise en place et d'ancrage du ballon et emplacements des zones des essais atmosphériques représentées en jaune sur les cartes de Mururoa et Fangataufa. Les postes d'enregistrement avancés (PEA), sont également localisés sur les cartes.

Les essais réalisés par largage à partir d'avions, en reproduisant l'utilisation des armes nucléaires, ont permis de valider le fonctionnement de systèmes d'armes dans des conditions opérationnelles. Trois de ces essais d'engins proches des versions militaires ont été pratiqués en 1966, 1973 et 1974, à proximité des sites d'expérimentations. L'explosion des engins a eu lieu à des altitudes similaires à celles des essais réalisés sous ballon.

II.2.1.1 - PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

L'objectif de ce paragraphe est de fournir les données nécessaires à la compréhension des conséquences environnementales en champs proche et régional des essais atmosphériques menés au CEP. La formation du nuage radioactif sera donc resituée dans la chronologie d'un essai et son évolution au cours du temps sera présentée. En revanche, les principales conséquences mécaniques et thermiques sur l'environnement ne seront pas abordées car elles ont été décrites dans l'ouvrage sur les atolls de Mururoa et Fangataufa consacré aux expérimentations nucléaires.

À partir du dégagement initial d'énergie, une explosion nucléaire atmosphérique connaît cinq phases qui correspondent à différents modes de transfert de l'énergie. Les échelles spatiales et temporelles des phénomènes associés à ces phases varient considérablement.

L'évolution chronologique des principaux phénomènes, radiatifs, thermiques ou mécaniques, consécutifs à une explosion nucléaire à basse altitude montre que c'est au cours des premiers instants que les conséquences sur l'environnement du CEP étaient les plus importantes (Fig. 26).

Cette période englobe la phase de dépôt radiatif proprement dite, qui dure quelques microsecondes au cours desquelles l'énergie émise directement par la source nucléaire interagit avec les matériaux environnants pour donner naissance à une sphère de plasma : la boule de feu. À cette phase initiale succède la phase A durant laquelle le principal mécanisme de transfert de l'énergie est la diffusion thermique. La boule de feu connaît alors une expansion rapide et son rayon atteint quelques dizaines de mètres. Cette phase dure quelques centaines de microsecondes jusqu'à ce qu'un autre mode de transfert d'énergie, mécanique, apparaisse et prenne de plus en plus d'importance.

La phase B de l'explosion débute par un choc violent accompagné d'un flash lumineux qui se détache progressivement de la boule de feu en expansion. Au bout de quelques centaines de millisecondes, la boule de feu, dont le rayon dépasse plusieurs centaines de mètres, devient visible. À ce stade débute la phase C qui, outre la propagation de l'onde de choc dans l'air (connue sous le nom de souffle), se caractérise par l'émission d'un rayonnement thermique et lumineux très important : le flash thermique. L'essentiel des dégâts observés sur la faune et la flore terrestre ou marine dans un rayon de quelques kilomètres est provoqué pendant les quelques secondes que dure la phase C.

Rapidement, les effets du choc ou du flash thermique sur le milieu s'atténuent. Au-delà d'une dizaine de secondes apparaissent d'autres phénomènes, tardifs à l'échelle de l'explosion, et de plus longue durée. Il s'agit en particulier des ondes hydrauliques induites dans le lagon et surtout de la formation progressive du nuage radioactif qui caractérise la phase D de l'explosion.

Au cours des jours suivant l'explosion, la propagation lointaine du nuage radioactif dans les différentes couches de l'atmosphère fait partie des phénomènes détectables à grande distance.

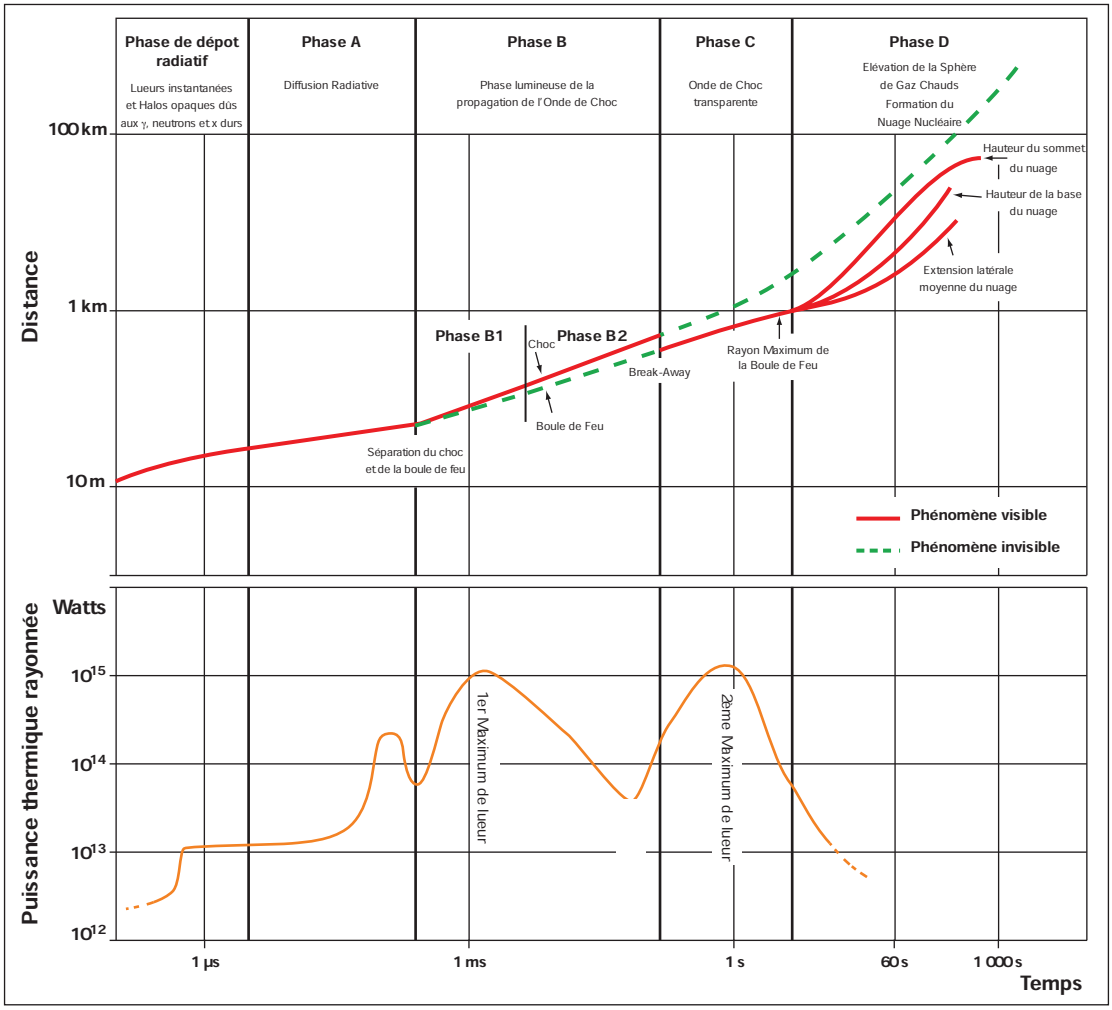


FIG. 26. - Chronologie des principaux phénomènes radiatifs, thermiques ou mécaniques, dans le cas d'une explosion nucléaire à basse altitude d'un engin d'une puissance d'une mégatonne. Le tracé du haut illustre l'évolution spatio-temporelle de la boule de feu, du choc aérien et du nuage dans la première demi-heure suivant l'essai. La figure du bas représente la puissance thermique rayonnée au cours du temps. La forme de cette courbe, deux pics séparés par un minimum, est caractéristique des explosions nucléaires. Le deuxième maximum correspond au flash thermique classiquement décrit.

II.2.1.2 - FORMATION DU NUAGE RADIOACTIF

Les phénomènes dits tardifs sont définis comme l'ensemble des événements qui se développent entre le début de l'élévation de la sphère de gaz chauds dans l'air et la stabilisation du nuage radioactif dans les hautes couches de l'atmosphère, c'est-à-dire au-delà de quelques secondes après l'instant zéro (Fig. 27).

Pendant que l'onde de choc se propage, la sphère de gaz chauds, qui a une faible densité par rapport à l'atmosphère ambiante, s'élève comme une montgolfière avec une vitesse pouvant atteindre une centaine de mètres par seconde au début de l'ascension. Il en résulte de violents courants d'air ascendants. Lors des explosions à faible altitude, la terre, l'eau et des débris divers sont aspirés et forment une colonne verticale entre le sol et la sphère de gaz chauds qui prend l'aspect d'un nuage.

Les échanges thermiques entre ce nuage encore chaud et l'air ambiant produisent des mouvements tourbillonnaires de forme toroïdale, les gaz s'élevant dans la partie centrale du nuage et redescendant par l'extérieur. Ce phénomène, associé à la colonne de débris, donne à l'ensemble sa forme caractéristique de champignon (Fig. 28). Dans certains cas, les débris aspirés dans la colonne retombent vers le sol sous la forme d'un cône qui entoure la partie haute de la colonne en s'évasant vers le bas.

La forme visible de ce nuage, qui ne correspond pas exactement au «nuage radioactif», est due à la condensation de la vapeur d'eau aspirée dans la partie centrale, reprise par les mouvements tourbillonnaires toroïdaux de la partie supérieure et entraînée par les courants descendants extérieurs vers les basses couches où l'eau s'évapore. La vitesse ascensionnelle du nuage varie avec l'énergie de l'explosion et les conditions atmosphériques. Elle ralentit au fur et à mesure du refroidissement des gaz. Pour l'explosion de 1 Mt, la vitesse d'élévation moyenne du sommet du nuage est de 400 km.h^{-1} pendant la première minute.

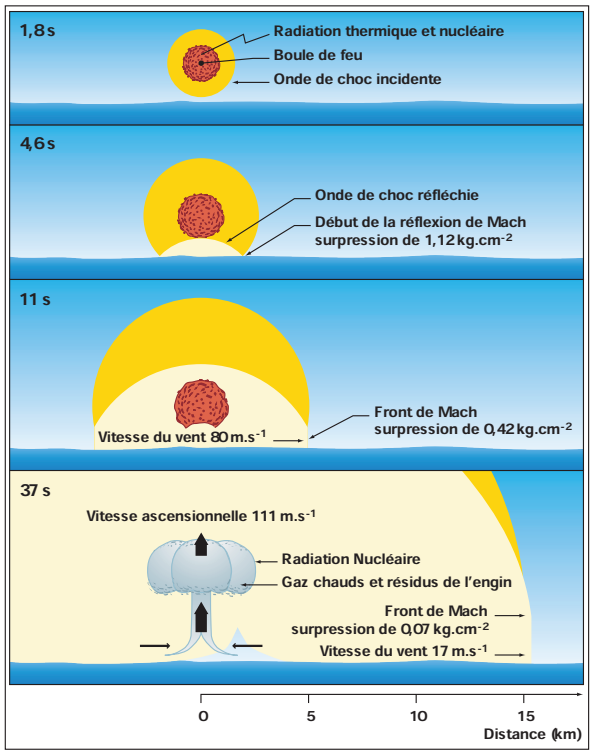


FIG. 27. - Evolution spatiale et interaction avec la surface du sol ou de l'océan d'une explosion atmosphérique de 1 Mt à 2 000 m d'altitude.

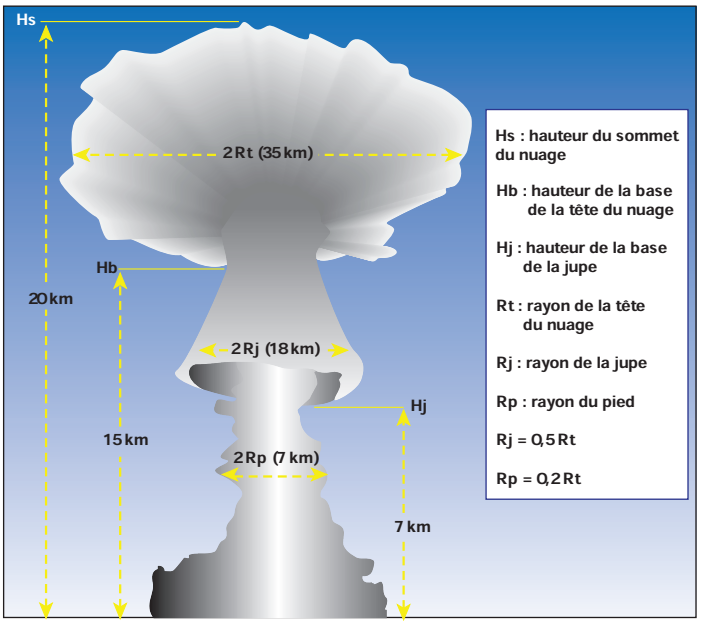


Fig. 28 - Ordre de grandeur des dimensions du nuage initial stabilisé pour une explosion de 1 Mt en atmosphère tropicale.

Le nuage atteint sa hauteur maximale au bout d'une dizaine de minutes, lorsque, après avoir traversé la tropopause, il arrive dans la stratosphère où il se stabilise.

Le nuage est considéré comme stabilisé lorsqu'il est en équilibre thermodynamique avec l'atmosphère. Pour une énergie d'une mégatonne, le sommet du nuage stabilisé se situe vers 23 km d'altitude et sa base vers 16 km. Son diamètre moyen peut atteindre 40 km au bout de 10 minutes.

II.2.1.3 - DISTRIBUTION INITIALE DE LA RADIOACTIVITÉ AU SEIN DU NUAGE

La répartition de la radioactivité dans le nuage stabilisé a fait l'objet d'études théoriques validées par des mesures réalisées sur des échantillons prélevés *in situ* au cours de missions de pénétrations pilotées. La radioactivité contenue dans le nuage est proportionnelle à l'énergie développée par l'engin testé, de l'ordre de 2.10^{19} Bq.kt^{-1}, une heure après l'explosion. Les dimensions du nuage, donc son volume, croissent en fonction de cette même énergie. Ainsi, les activités volumiques de la radioactivité au sein du nuage stabilisé dépendent peu de l'énergie de l'essai.

Le profil de l'activité volumique pouvait donc être calculé suivant une loi de distribution de la radioactivité en fonction de l'altitude réduite Z/Zs (Fig. 29). Zs étant le sommet de la tête du nuage lorsqu'il était stabilisé. L'activité volumique dans le nuage initial stabilisé, était généralement comprise, selon l'altitude Z, entre $3,7.10^{6}$ et $3,7.10^{9}$ Bq.m^{-3}, et dépassait rarement $3,7.10^{9}$ Bq.m^{-3}.

Les plus fortes activités volumiques se situaient dans la partie supérieure, aux trois quarts de l'altitude atteinte par le sommet du nuage. Dans la partie inférieure, les activités volumiques étaient nettement plus faibles et décroissaient avec la diminution de l'altitude, de $3,7.10^{8}$ (Z/Zs) à $3,7.10^{6}$ Bq.m^{-3}.

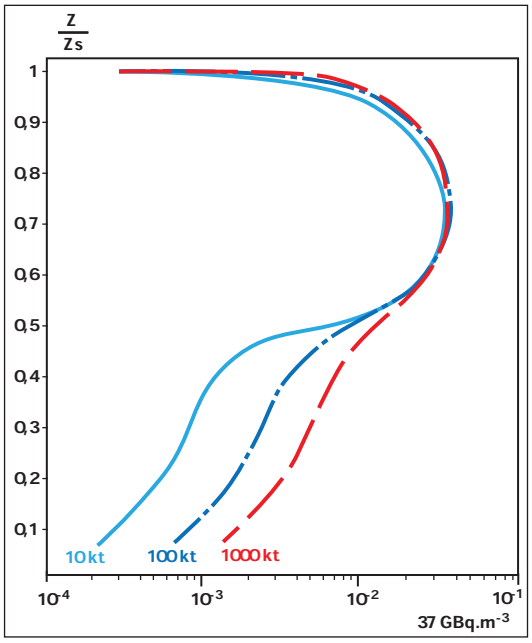
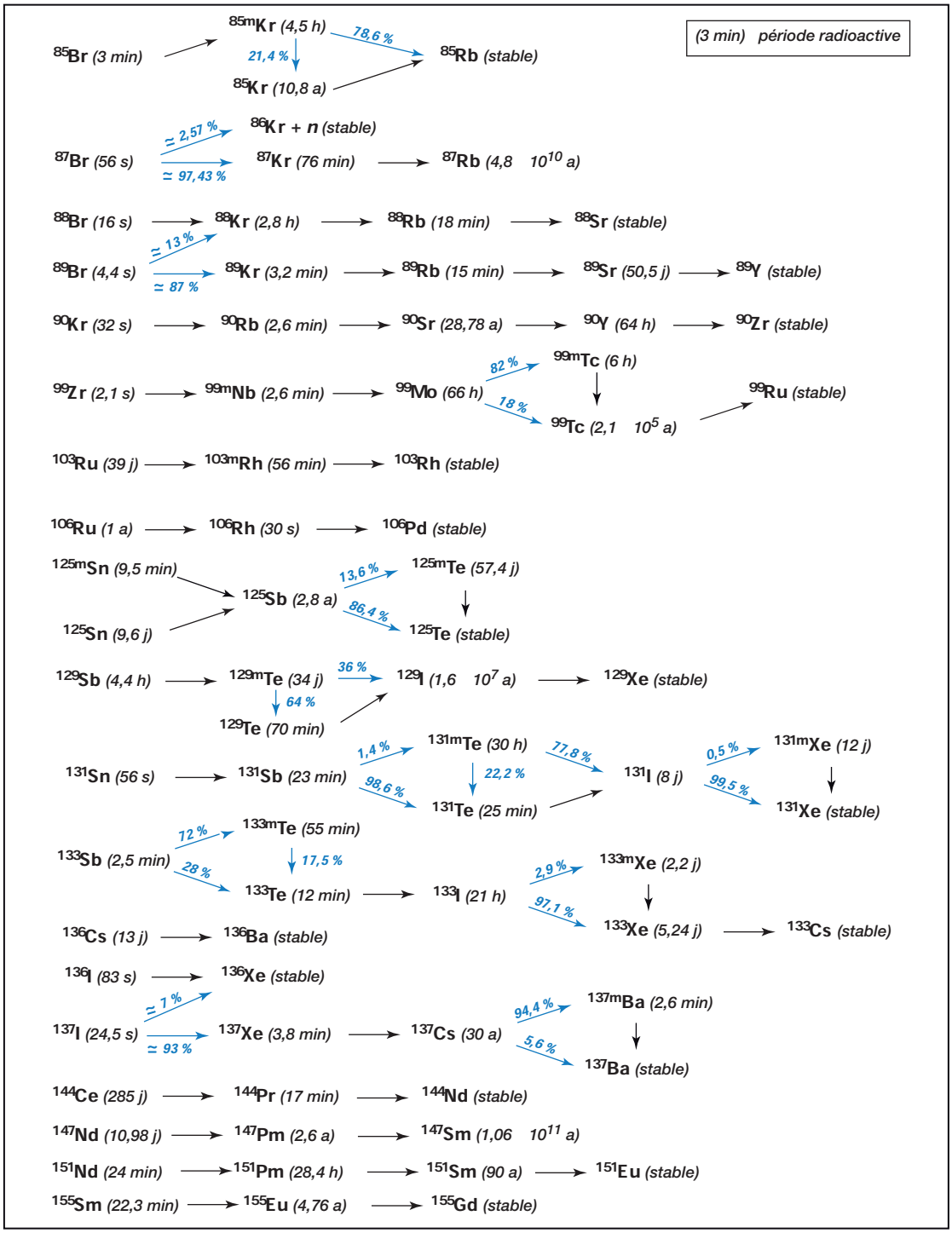


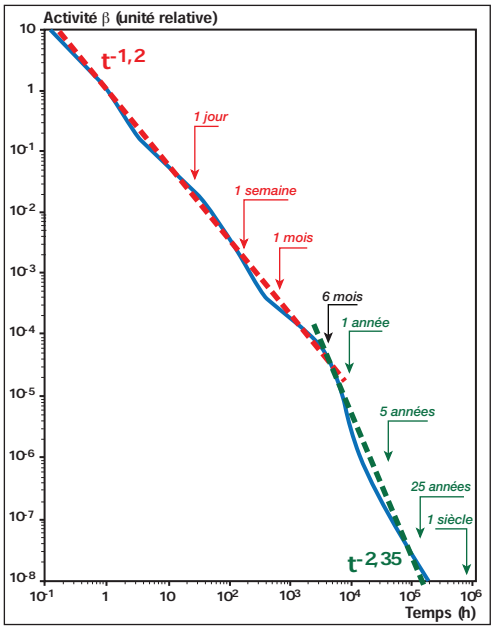
FIG. 29. - Profils verticaux de l'activité volumique (37 GBq.m^{-3}) 1h après l'essai en fonction de l'altitude Z rapportée à celle du sommet Zs dans le nuage stabilisé initial, pour trois domaines d'énergie libérée par des explosions nucléaires.

II.2.1.4 - DÉCROISSANCE DE LA RADIOACTIVITÉ AU SEIN DU NUAGE

La matière nucléaire non consommée lors de l'explosion et les produits de fission présents dans le mélange initial étaient, pour la plupart, loin de leur ligne de stabilité (cf. Annexe 1). La désintégration radioactive de ces radionucléides, essentiellement par décroissance radioactive bêta, est souvent accompagnée de rayonnements gamma (Tableau 3). Généralement, les radionucléides du début de chaîne ont des périodes radioactives plus courtes que ceux situés en fin de filiation.

TABLEAU 3.
Exemple de quelques chaînes de fission pouvant être observées après un essai.





L'évolution en fonction du temps de l'indice bêta global du mélange (Fig. 30) décroît sensiblement selon une loi empirique en $t^{-1,2}$ jusqu'à 180 jours après l'essai ; au-delà, la décroissance s'accélère et la loi s'exprime en $t^{-2,35}$, soit l'équation suivante:

$$A_\beta = A_1.t^{-x}$$

(x = 1,2 pour 1 h ≤ t ≤ 180 jours
et x = 2,35 pour 180 jours ≤ t)

avec :

- A_β, l'activité bêta globale à l'instant t en heures après l'explosion,
- A_1 l'activité bêta globale à l'instant t+1 en heures ;
- t, le temps exprimés en heure à partir de l'instant zéro de l'explosion.

FIG. 30. - Décroissance au cours du temps de l'indice bêta global d'un mélange non fractionné de produits de fission.

Les produits de fission initiaux et leurs descendants évoluent dans le temps en fonction de leurs périodes radioactives respectives. L'évolution de la contribution relative de chaque radionucléide émetteur bêta à l'activité bêta globale du mélange théorique non fractionné de produits de fission peut être calculée en fonction du temps après l'instant zéro de l'explosion (Fig. 31). Les radionucléides de période égale ou supérieure à un an comme ^{95}Zr, ^{106}Rh, ^{144}Ce, ^{125}Sb, ^{90}Sr, ^{137}Cs jouent un rôle prépondérant dans l'activité globale du nuage radioactif.

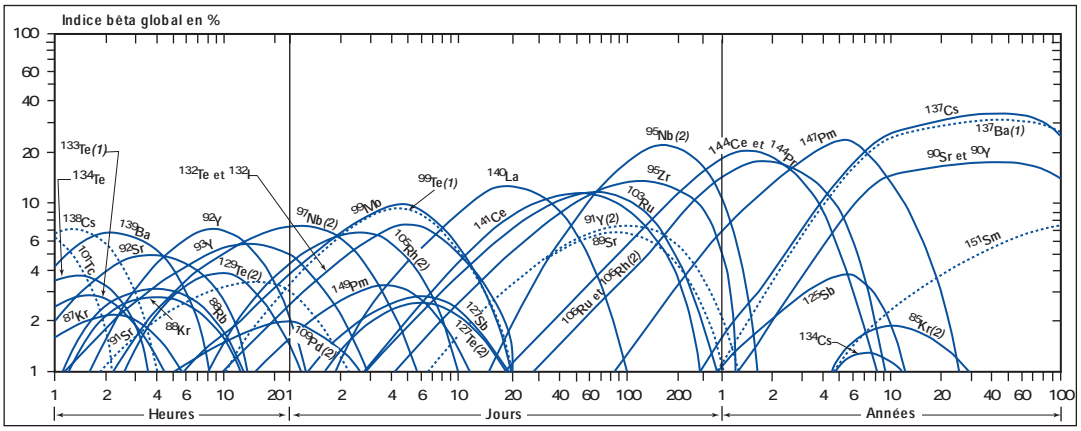


FIG. 31. - Évolution au cours du temps de la contribution relative (%) à l'indice bêta global associé aux radionucléides émetteurs bêta-gamma présents dans le mélange initial non fractionné de produits de fission générés lors d'un essai thermonucléaire.

L'évolution théorique de l'indice bêta global du mélange suit la baisse des activités volumiques des différents radionucléides présents en fonction de leur période radioactive respective. Le calcul, en fonction du temps, de la contribution relative des radionucléides émetteurs bêta au débit de dose global du mélange non fractionné de produits de fission générés par la fission de ^{235}U ou de ^{239}Pu lors d'un essai montre que deux semaines après l'explosion, la quasi-totalité du débit de dose résulte d'une dizaine de radionucléides (Fig. 32).

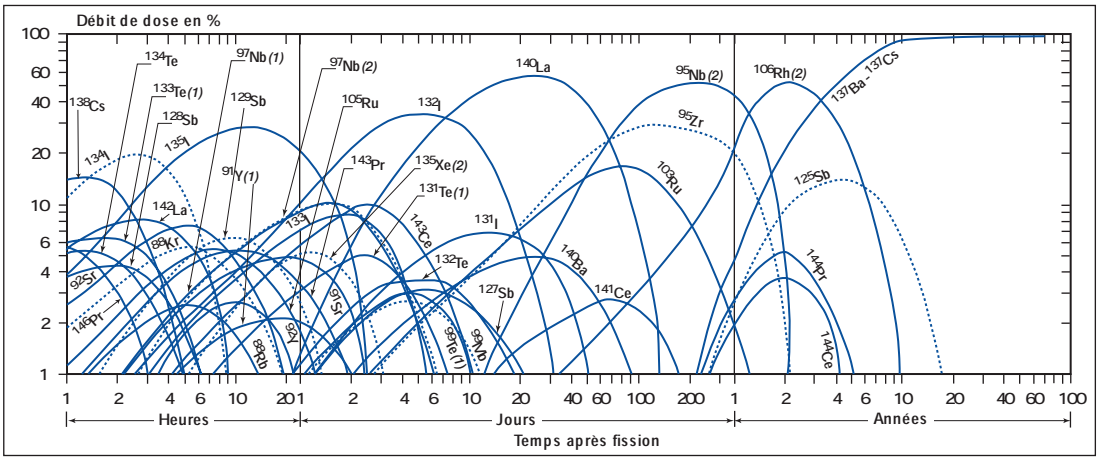


FIG. 32. - Évolution au cours du temps de la contribution relative (%) au débit de dose global des radionucléides présents dans le mélange non fractionné de produits de fission générés lors d'un essai thermonucléaire.

II.2.1.5 - FRACTIONNEMENT DES RADIONUCLÉIDES AU SEIN DU NUAGE

Différents facteurs sont susceptibles de modifier la répartition et l'évolution relative de la radioactivité du mélange théorique. Ainsi, le fractionnement des radionucléides en fonction des tailles de particules associées au nuage est un facteur prépondérant. En effet, les explosions nucléaires produisaient un large spectre de tailles de particules, généralement compris entre 10^{-4} et 1 000 µm, dont la forme de la courbe de distribution était fonction des conditions de l'essai. Le fractionnement des radionucléides associés à ces particules commençait dès la phase de refroidissement et de condensation au sein du nuage, immédiatement après l'explosion.

Lors des explosions sur barge au niveau de la mer, la distribution des tailles des aérosols créés était dissymétrique, avec une majorité de particules de taille comprise entre 25 à 1 000 µm. La distribution associée aux essais sous ballon s'étendait de 0,05 à 100 µm, par réduction du nombre des particules ayant les tailles les plus importantes, tels les cristaux de sels générés par l'évaporation de l'eau de mer sous l'effet de la boule de feu.

Lors des explosions en altitude, la majorité des aérosols produits avaient un diamètre très inférieur à 50 µm. Ils pouvaient alors rester plusieurs années en suspension dans la troposphère ou dans la stratosphère. Une fraction de ces particules s'agrégeait avec des aérosols naturels pour former des particules de plus grande taille qui sédimentaient progressivement dans les couches basses de l'atmosphère, avant de se déposer à la surface du sol et des océans (Fig. 33). Aujourd'hui, la concentration des particules générées lors des essais est devenue négligeable, par dilution dans le réservoir atmosphérique à l'échelle de la planète, et leur activité massique a très fortement diminué car la grande majorité des radionucléides associés a complètement disparu par décroissance radioactive.

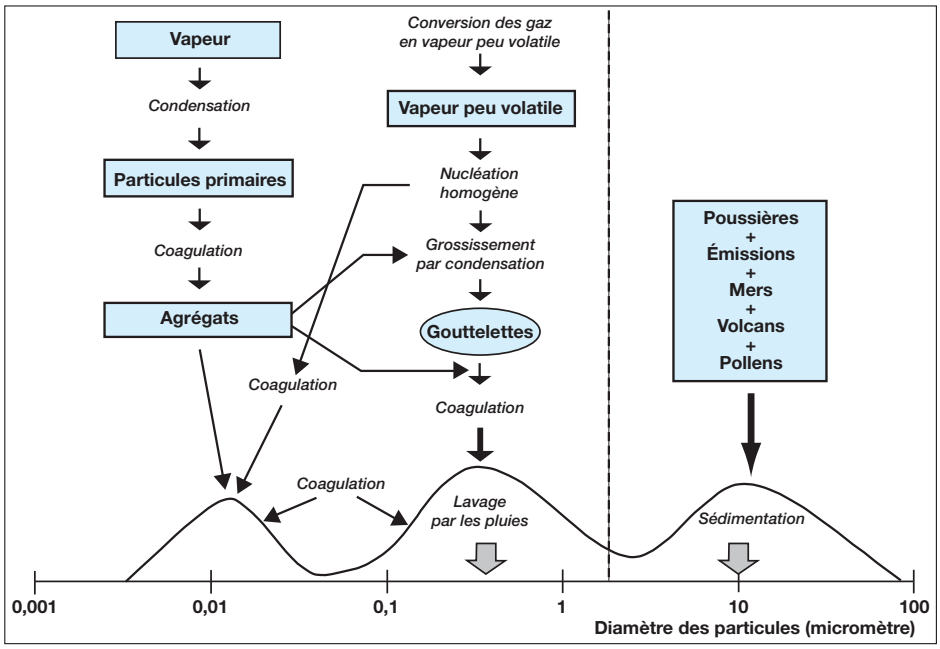


FIG. 33. - Distribution granulométrique des aérosols atmosphériques. Modes de formation et d'élimination.

La fraction des aérosols de diamètre supérieur à 50 µm se déposait rapidement, en fonction des conditions météorologiques. C'est pourquoi, dans un délai assez court, les essais ont été menés en altitude, au-dessus de l'eau, afin d'améliorer la sécurité en diminuant le nombre des particules de taille supérieure à 50 µm, limitant ainsi les retombées les plus proches (Fig. 34).

La prévision de la dispersion des radionucléides contenus dans le nuage stabilisé est possible à partir de la connaissance ou de l'évaluation de paramètres comme l'énergie de l'essai, la géométrie du nuage stabilisé, la répartition des concentrations et de la taille des aérosols, les vitesses de chute et de dépôt des particules, les coefficients de diffusion des particules et des gaz. La connaissance de certaines données météorologiques, telles que la pression atmosphérique, la température, la vitesse et la direction du vent, est également nécessaire pour prédire la dispersion des radionucléides dans l'atmosphère.

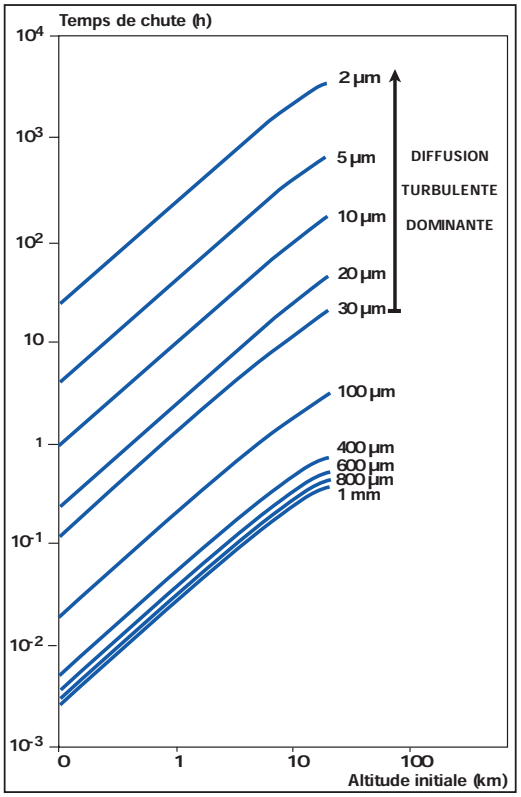


FIG. 34. - Temps de chute (h) jusqu'au sol des aérosols, en fonction de leur rayon (µm) et de l'altitude (km).

II.2.1.6 - ÉVOLUTION DES PRODUITS D'ACTIVATION

Les produits d'activation, faiblement représentés dans le nuage radioactif, ne suivaient pas une loi de décroissance en $t^{-1,2}$, identique à celle des produits de fission. Leur évolution relative, dans les différentes composantes de l'environnement, était calculée en fonction des produits d'activation du mélange initial et de la matrice considérée : eau de mer, sédiments, etc. (Tableau 4).

TABLEAU 4.
Évolution de la contribution relative (%) des différents produits d'activation à l'activité bêta globale induite dans les eaux du lagon de Mururoa, mesurée lors des deux expérimentations atmosphériques sous ballon Altaïr et Bételgeuse (*ND : non détecté*).

	Radioéléments					
	^{38}Cl	^{24}Na	^{35}S	^{32}P	^{82}Br	^{80m}Br
Période / Temps	37,24 mn	14,6 h	87,51 j	14,28 j	1,47 j	4,42 h
Essai Altaïr						
H + 3	14,1	83,5	1,1	ND	0,2	1,1
H + 6	0,08	96,4	1,5	ND	0,3	0,9
H + 10	ND	97,3	1,8	ND	0,3	0,6
J + 1	ND	95,5	3,5	0,24	0,5	0,14
J + 2	ND	88,7	9,7	0,75	0,85	ND
J + 4	ND	47,5	47,5	3,5	1,5	ND
J + 6	ND	9,2	84,0	5,7	1,0	ND
Essai Bételgeuse						
H + 3	24,0	74	0,32	ND	0,2	ND
H + 6	1,5	98	0,25	ND	0,25	ND
J + 1	ND	99	0,6	ND	0,4	ND
J + 2	ND	97	1,8	0,2	1,0	ND
J + 4	ND	82	1,5	1,3	2,8	ND
J + 6	ND	34	56	4,6	4,2	ND

II.2.2 - ESSAIS SOUTERRAINS

En 1972, il a été décidé de réaliser les essais au fond de puits souterrains. En 1974, après une phase exploratoire, il s'est avéré que la structure géologique des atolls de Mururoa et Fangataufa, en particulier les formations basaltiques, permettait de réaliser ce type d'essais, dans des conditions de sécurité optimales, tout en assurant le confinement dans le futur des produits radioactifs créés lors de l'explosion.

De 1975 à 1986, les essais ont été réalisés dans des puits verticaux forés depuis la partie émergée de la couronne des atolls, pénétrant profondément dans le socle basaltique. À partir de 1981, certains ont également été effectués dans des puits forés sous le lagon, en recourant à des moyens de forage *off shore*. À partir de 1987, tous les essais ont été menés dans des puits sous les lagons, à l'exception d'un essai de sécurité pratiqué en 1989.

Lors des essais souterrains, l'engin était placé dans un conteneur, qui était ensuite descendu entre 400 et 1 200 mètres de profondeur, dans des puits creusés jusqu'au sein des formations basaltiques. Ce conteneur comprenait l'ensemble de l'instrumentation permettant de mesurer les rayonnements émis. Avant la réalisation de l'essai, le puits était comblé, en partie basse, avec du sable de basalte favorisant la vitrification des produits radioactifs issus de l'essai et, en partie haute, par un bouchon de ciment assurant le confinement des éléments radioactifs.

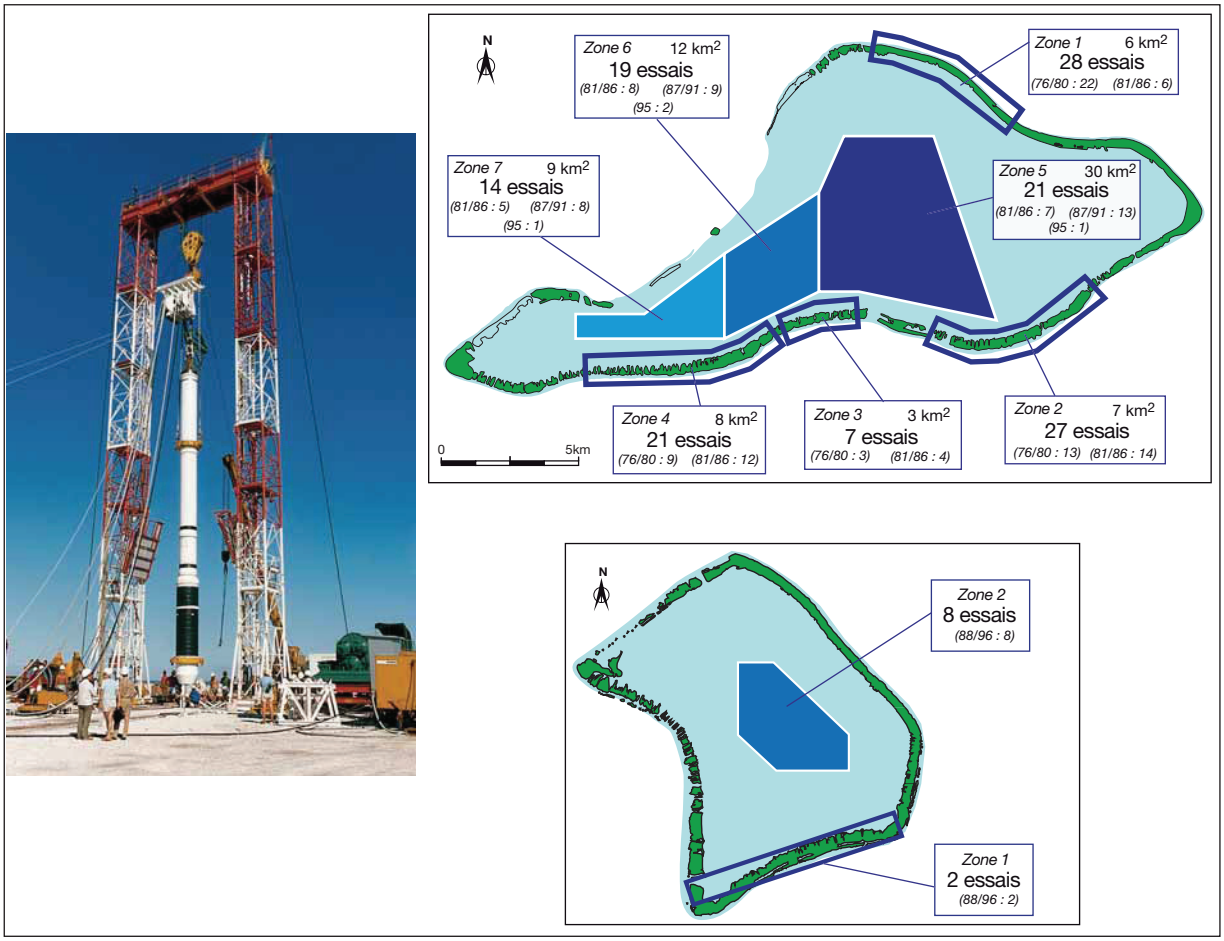


FIG. 35. - Descente d'un conteneur dans un puits foré à terre et emplacement des zones d'essais souterrains, sous la couronne et le lagon, à Mururoa et Fangataufa.

II.2.2.1 - PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Les événements se succédant à proximité du point zéro souterrain, à partir de la mise à feu de l'engin nucléaire, suivent plusieurs phases, différentiables par le mode de transfert de l'énergie et la réponse du milieu géologique (Fig. 36). Quatre phases sont classiquement distinguées :

La phase nucléaire correspond à l'expansion du plasma à haute température résultant de la réaction nucléaire au sein de la chambre d'explosion. Elle ne diffère pas de celle qui accompagne une explosion atmosphérique tant qu'il ne se produit pas d'interaction significative avec le milieu extérieur à l'enveloppe de l'engin, c'est-à-dire jusqu'à quelques dizaines de nanosecondes. Passé cet instant, les matériaux du conteneur et le basalte environnant absorbent les rayonnements et, de façon analogue à ce qui se passe dans l'air au cours des essais atmosphériques, une boule de feu est créée, d'où se détache l'onde de choc.

La phase hydrodynamique débute à l'instant où les transferts deviennent essentiellement mécaniques. Elle concerne une zone limitée à quelques dizaines de mètres autour de l'explosion, où la roche encaissante est vaporisée, fondue et fracturée. Alors que l'onde de choc se propage, les gaz de la roche, à hautes pression et température, repoussent les terrains environnants, provoquant la formation d'une cavité dont l'expansion est contrariée par la résistance du milieu et les contraintes préexistantes dans le massif géologique.

La phase élasto-plastique constitue la transition vers le régime de propagation sismique. C'est au cours de cette phase que se développe un réseau de fractures de moins en moins dense avec l'éloignement du point d'explosion et dont l'extension est limitée par la résistance du milieu et les contraintes dues à la gravité.

La phase finale regroupe les événements se produisant à des temps plus ou moins longs, après le passage de l'onde de choc. La cavité, qui atteint son rayon maximal lorsque la poussée

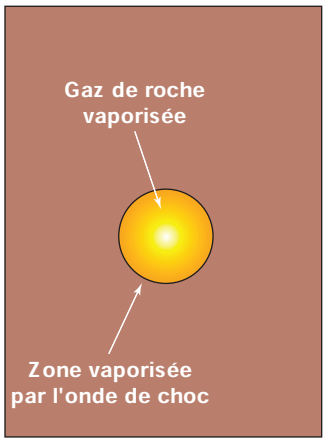


FIG. 36a. - Après quelques dizaines de microsecondes. *Les réactions nucléaires sont achevées. L'énergie des rayonnements vaporise la roche en engendrant des pressions élevées et une onde de choc intense.*

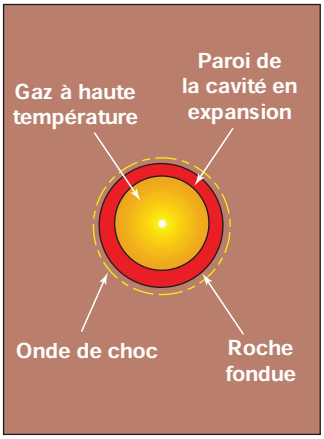


FIG. 36b. - Après quelques centaines de microsecondes. *L'onde de choc transforme la roche environnante, la chaleur générée vaporise et fait fondre de nouveaux matériaux.*

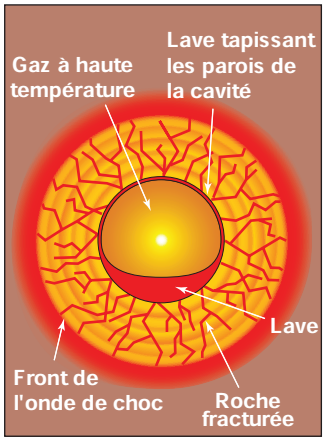


FIG. 36c. - Après quelques dizaines de millisecondes. *La cavité se stabilise et la lave fondue s'accumule au fond en piégeant la majeure partie des radionucléides réfractaires.*

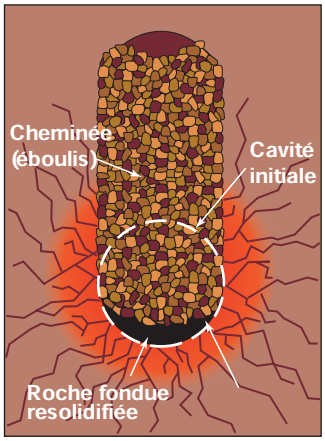


FIG. 36d. - Plusieurs minutes à plusieurs heures après l'essai. *La roche fondue commence à se solidifier et le toit de la cavité s'effondre, créant une cavité-cheminée.*

des gaz n'est plus suffisante pour compacter les terrains, commence à se refroidir. La majeure partie des matériaux fondus ou vaporisés se condense au fond de la cavité en formant un ménisque de lave. Le refroidissement se poursuivant, la pression baisse dans les terrains encaissants et dans la cavité, dont la voûte s'effondre. Cet effondrement forme une cheminée. Il ne s'achève parfois qu'après plusieurs heures, voire plusieurs jours, provoquant la formation d'un cône d'éboulis, dont la hauteur est rapidement limitée par un processus de stabilisation naturel.

II.2.2.2 - ÉVOLUTION HYDROGÉOLOGIQUE

À la périphérie de cet ensemble cavité-cheminée, l'eau initialement présente dans les couches géologiques saturées du massif a été repoussée avec les terrains. Le refroidissement progressif des matériaux et la condensation d'une partie des gaz met l'ensemble cavité-cheminée en dépression, par rapport aux terrains environnants qui se décompriment. Ce déséquilibre favorise le drainage de l'eau présente, depuis ces terrains vers la cavité. Ce drainage centripète peut se poursuivre pendant des semaines, voire des mois, en fonction de l'énergie de l'explosion, de la perméabilité et de la teneur en eau des formations environnantes, dont il modifie le système hydrogéologique (Fig. 37).

Dans un deuxième temps, après la remise en eau de l'ensemble cavité-cheminée, cette eau va se réchauffer au contact des matériaux ayant stocké le dépôt thermique de l'explosion. L'eau plus chaude, donc plus légère, présente dans la cavité va tendre à migrer vers le haut, à travers les terrains volcaniques de la couverture surmontant la cheminée, avec une vitesse dépendant de la perméabilité et de l'épaisseur de cette couverture. Cette eau est remplacée par une eau plus froide provenant des terrains environnants, contribuant au refroidissement de l'eau de la cheminée qui, simultanément, se refroidit aussi, par conduction au niveau de la paroi. Ce réchauffement induit une perturbation locale du système hydrogéologique naturel au sein du volcanisme, perturbation qui disparaîtra avec la dissipation progressive de ce dépôt thermique.

Dans la zone située à la périphérie de la cavité, les circulations naturelles des eaux interstitielles sont modifiées pendant quelques dizaines à quelques centaines d'années, sous l'effet de l'énergie déposée dans la cavité, sous forme calorifique.

Les études de confinement à long terme des produits radioactifs résultant d'un essai souterrain ont pris en compte l'ensemble de ces processus ainsi que ceux décrits brièvement dans les paragraphes suivants. En effet, il s'agissait d'évaluer les risques d'exposition des populations vivant dans le Pacifique Sud à partir d'éventuels relâchements de radionucléides depuis les cavités-cheminées et de leur diffusion à travers les formations géologiques jusqu'aux eaux océaniques (cf. Chapitre VII).

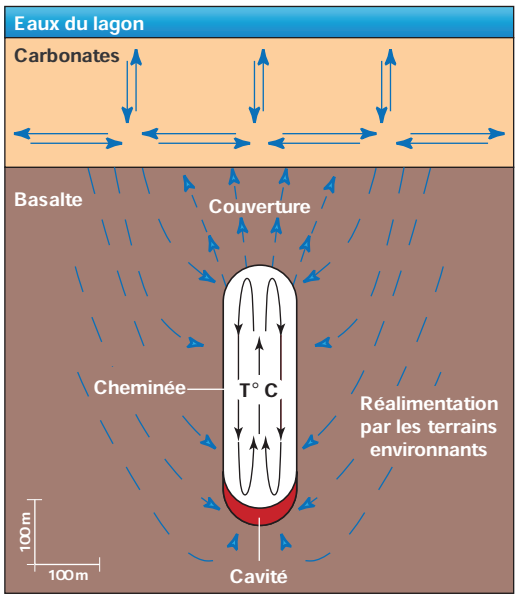


FIG. 37. - Circulation des eaux au sein d'une cavité-cheminée et dans les terrains encaissants.

II.2.2.3 - MISE EN PRESSION DES GAZ DE LA CAVITÉ

Lorsque la lave s'est solidifiée, le gaz contenu dans la cavité est essentiellement constitué de vapeur d'eau. Au début de l'effondrement de la voûte, l'apport de matériau froid condense cette vapeur d'eau ; il ne reste alors que les gaz incondensables. La quantité de gaz formé, exprimée à température et pression normales, varie en fonction de l'énergie de l'explosion : entre 5 000 $m^3.kt^{-1}$, pour une énergie de quelques kilotonnes, et 2 000 ou 3 000 $m^3.kt^{-1}$, pour une énergie de quelques dizaines de kilotonnes. À ce stade, la cheminée se trouve en dépression par rapport aux terrains qui l'entourent. À mesure que l'eau drainée des formations environnantes remplit la cheminée, les gaz sont comprimés au-dessus de la surface de l'eau, jusqu'à ce que leur pression soit en équilibre avec la pression hydrostatique qui règne au sommet de la cheminée. En fin de remplissage, les gaz se dissolvent progressivement dans l'eau et peuvent migrer lentement, par diffusion, dans l'eau interstitielle.

II.2.2.4 - DISTRIBUTION INITIALE DE LA RADIOACTIVITÉ DANS LA CAVITÉ

Les radionucléides produits par l'explosion nucléaire étaient présents au sein de plusieurs phases de la cavité-cheminée. La répartition des radionucléides entre ces phases, qui dépend de leur forme chimique et de leur volatilité, est très importante car elle influe sur leur aptitude à s'échapper de la cavité-cheminée, puis à se déplacer dans la géosphère avant de rejoindre éventuellement la biosphère. Ces trois phases sont : une phase solide de lave et d'éboulis, une phase gazeuse et les solutions aqueuses.

- La lave, qui se forme surtout au fond de la cavité-cheminée, contient la majeure partie des éléments réfractaires (ou non volatils), comprenant les actinides et lanthanides. Le relâchement des radionucléides de la lave est un processus qui s'effectue lentement.
- Les éboulis ou matériaux broyés contiennent des radionucléides essentiellement retenus par des phénomènes d'adsorption réversibles.
- Les gaz et les solutions sont les phases qui contiennent les éléments gazeux, volatils et solubles dans l'eau comme les gaz rares et le tritium.

La répartition des radionucléides, entre la lave et les éboulis, dépend de la volatilité de la forme chimique de chaque élément, à l'intérieur de la cavité-cheminée, pendant le refroidissement (Tableau 5). Il existe une somme considérable de données publiées concernant la répartition des radionucléides, sur la base de mesures effectuées sur différents sites d'expérimentations nucléaires. Certains radionucléides ayant des périodes importantes, de l'ordre de 30 ans, comme le ^{137}Cs et le ^{90}Sr, ont des précurseurs gazeux (gaz rares) et/ou volatils, dont les périodes sont comparables aux durées des processus de condensation et de solidification : ^{137}I (période 24 secondes) et ^{137}Xe (période 3,8 minutes) pour le ^{137}Cs, et ^{90}Kr (période 32 secondes) et ^{90}Rb (période 2,6 minutes) pour le ^{90}Sr. La répartition de ces radionucléides, entre la lave et les éboulis, dépendra de la fraction des précurseurs qui se sera désintégrée avant que la lave ne se solidifie. De nombreux facteurs interviennent sur la vitesse de refroidissement, tels que l'énergie de l'essai et le moment de l'effondrement de la cavité-cheminée qui tend à refroidir la lave en fusion. Compte tenu de ces facteurs, la répartition du ^{90}Sr est estimée à 40 % dans la lave et à 60 % dans les éboulis. Dans le cas du ^{137}Cs, la situation est plus complexe, l'estimation du pourcentage de césium dans la lave varie entre 25 et 40 %, en fonction de l'énergie de l'essai. Les pourcentages les plus élevés correspondent aux essais de grande énergie, supérieure à 40kt.

En ce qui concerne les actinides et les lanthanides, 98 % de l'activité de ces éléments est associée à la lave. Le pourcentage du plutonium présent dans les éboulis est donc important mais, comme le montrent les activités volumiques du plutonium mesurées dans l'eau des cavités-cheminées, il se solubilise progressivement.

TABLEAU 5.
Répartition relative (%) des radionucléides à l'intérieur de la cavité d'essai.

Radionucléide	Lave	Éboulis	Gaz	Eau	Observations
^{3}H	0	0	2	98	Majoritairement eau tritiée
^{14}C	0	10	80	10	Gaz ou solution
^{36}Cl	50	40	0	10	Volatilité intermédiaire
^{41}Ca	70	30	0	0	Relativement volatil
^{55}Fe	95	5	0	0	Non volatil
^{59}Ni, ^{63}Ni	95	5	0	0	Non volatil
^{60}Co	90	10	0	0	Relativement non volatil
^{79}Se	70	30	0	0	Volatil
^{85}Kr	0	10	80	10	Gaz : tous les précurseurs sont volatils
^{90}Sr	40	60	0	0	Relativement non volatil, mais précurseurs volatils
^{93}Zr	95	5	0	0	Réfractaire mais précurseurs de volatilité intermédiaire
^{99}H	80	20	0	0	Volatil avec précurseurs volatils ou intermédiaires
^{106}Ru	70	30	0	0	Volatil avec précurseurs volatils
^{107}Pd	70	30	0	0	Relativement volatil
^{113m}Cd	70	30	0	0	Relativement volatil
^{121m}Sn	60	40	0	0	Relativement volatil
^{126}Sn	70	30	0	0	Relativement volatil
^{125}Sb	70	30	0	0	Relativement volatil
^{129}I	50	40	0	10	Volatil et soluble
^{134}Cs	20	80	0	0	Volatil intermédiaire sans précurseurs
^{135}Cs	20	80	0	0	Volatilité intermédiaire avec précurseurs volatils
^{137}Cs	25/40[a]	75/60[a]	0	0	Volatilité intermédiaire avec précurseurs volatils
^{147}Pm	95	5	0	0	Réfractaire sans précurseur volatil
^{151}Sm	95	5	0	0	Réfractaire sans précurseur volatil
^{152}Eu, ^{154}Eu	95	5	0	0	Réfractaire
^{155}Eu	95	5	0	0	Réfractaire sans précurseur volatil
^{236}U	90	10	0	0	Légèrement volatil selon l'état d'oxydation
^{237}Np	95	5	0	0	Réfractaire si produit à partir de ^{241}Am, légèrement volatil si issu du ^{237}U
^{238}Pu, ^{240}Pu	98	2	0	0	Réfractaire
^{239}Pu	98	2	0	0	Réfractaire : un précurseur est légèrement volatil
^{241}Pu, ^{242}Pu	98	2	0	0	Réfractaire
^{241}Am	98	2	0	0	Réfractaire

a : Selon l'énergie de l'essai. Le pourcentage de ^{137}Cs dans la lave a été estimé à 25 % à Mururoa (où les essais ont été généralement de faible énergie) et à 40 % à Fangataufa où les essais ont été généralement de plus grande énergie.

II.2.2.5 - ÉVOLUTION DE LA RADIOACTIVITÉ AU SEIN DE LA CAVITÉ

Les matières nucléaires non consommées et les produits de fission et d'activation présents dans le mélange initial ont été, dans leur quasi-totalité, confinés dans les différentes phases au sein de la cavité-cheminée. L'évolution, en fonction du temps, de l'activité bêta globale de l'ensemble du mélange décroît sensiblement, selon une loi empirique en $t^{-1,2}$ (Fig. 38).

La radioactivité globale de la phase gazeuse, essentiellement due aux isotopes radioactifs du xénon (^{131m}Xe, ^{135}Xe, ^{133}Xe, ^{133m}Xe) et du krypton (^{85m}Kr, ^{87}Kr, ^{88}Kr), décroît rapidement dans la cavité-cheminée, d'un facteur 100 entre quatre et huit jours après l'essai, en fonction de la puissance dégagée par l'explosion. La décroissance radioactive rapide de ces gaz limitait l'activité susceptible d'être libérée dans l'atmosphère lors des opérations de post-forage. De plus, ces gaz rares n'interagissant pas avec les composantes de l'environnement étaient très rapidement dispersés dans l'atmosphère, limitant les risques et niveaux d'exposition pour les travailleurs réalisant les opérations de post-forage.

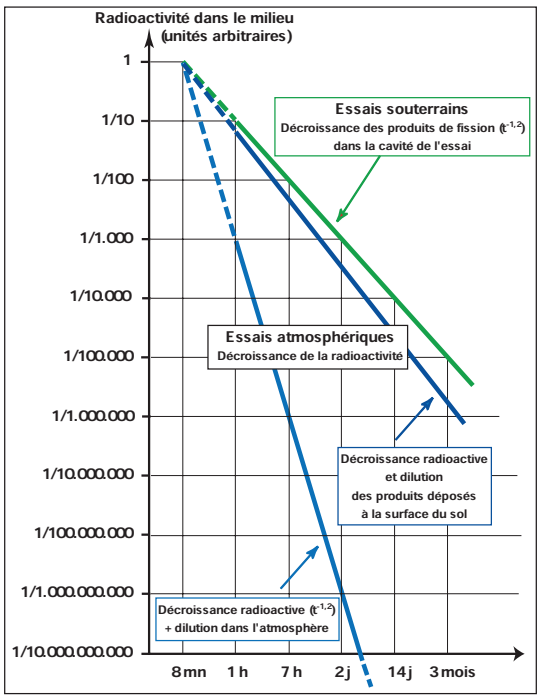


FIG. 38. - Décroissance du mélange radioactif créé par les essais nucléaires atmosphériques et souterrains (voir explications dans le texte).

L'importance du volume de lave engendré par l'ensemble des explosions nucléaires réalisé sur les deux sites d'expérimentations, soit environ 2,5 millions de tonnes, fait que l'activité massique associée aux matériaux solides est faible. L'évolution de l'activité massique des principaux radionucléides de période supérieure à 5 ans, initialement présents dans l'ensemble des cavités, a fait l'objet d'un calcul théorique (Fig. 39). Ainsi, celle des radionucléides émetteurs alpha dans la lave est comparable à celle d'un gisement d'uranium ayant une teneur de 0,7 %. Cependant, bien que ces activités soient relativement faibles, une évaluation des conditions radiologiques futures résultant du relâchement des radionucléides des cavités suivant différents scénarii a donc été réalisée pour ces populations (cf. Chapitre VII).

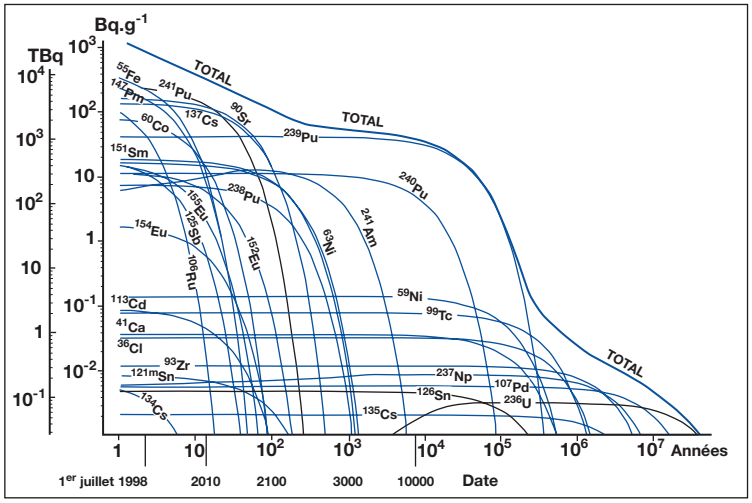


FIG. 39. - Activité totale due à l'ensemble des essais souterrains réalisés au CEP et activité spécifique des radionucléides dans la lave resolidifiée en fonction du temps, la lixiviation étant négligée.

II.2.2.6 - ÉMISSIONS GAZEUSES LORS DES POST-FORAGES

Lors des essais souterrains, les câbles transmettant les mesures, entre le conteneur et les cabines d'enregistrement situées en surface, présentaient des lignes de fuite de faible débit et constituaient la principale cause de rejets gazeux. Des cloches de récupération des gaz ont été mises en place au niveau de la tête de puits (essais sous lagon) ou de la plaque de raccordement des câbles du puits (essais sous couronne), afin de canaliser les gaz.

Destinés à réaliser des prélèvements d'échantillons de lave dans la cavité après un essai, les post-forages créaient un pont entre la surface et la cavité, qui pouvait également entraîner des rejets, gazeux ou liquides, lors du forage de la zone proche de la cavité-cheminée.

Dans tous les cas, des dispositifs de mesure de l'activité des gaz étaient mis en place (cf. Chapitre III) afin d'établir les bilans des rejets gazeux et liquides de ces essais (Tableau 6).

TABLEAU 6.
Essais souterrains ayant conduit à des rejets de gaz rares radioactifs.

Essais souterrains	Date	Rejets de gaz rares
HECTOR	26 novembre 1975	18,5 TBq le 9 décembre et 5,5 TBq le 10 décembre.
ULYSSE A	30 octobre 1976	0,4 TBq au moment de l'essai, 18,5 TBq le 12 novembre et 5,5 TBq le 13 novembre.
XANTHOS	1er juillet 1978	1 850 TBq, 18 minutes après l'essai (durée 12 minutes).
ARÈS	19 juillet 1978	66 TBq entre les 2 et 5 août.
IDOMÉNÉE	26 juillet 1978	Fuite non quantifiée estimée à quelques milliers de TBq, commençant 22 minutes après l'essai.
EUMÉE	19 décembre 1978	5 TBq au moment de l'essai, et 120 TBq, 8 heures après l'essai (durée 4 heures).
CHRYSOTHÉMIS	19 novembre 1979	1 110 TBq, une heure après l'essai (durée 3 heures).
ATRÉE	22 novembre 1979	74 000 TBq, 42 minutes après l'essai (durée 5 heures).
PELOPS	4 avril 1980	111 TBq, le 24 avril (durée 4 heures).
BURISIS	18 juin 1983	252 TBq, le 29 juin.
CERCYON	30 avril 1985	26 TBq, le 25 mai (durée 120 heures).
DANAÉ	29 novembre 1987	300 TBq entre les 15 décembre 1987 et 22 janvier 1988
DÉJANIRE	23 juin 1988	51 TBq à partir du 7 juillet (durée 60 jours).
ACRISIOS	25 octobre 1988	74 TBq à partir du 4 novembre (durée 6 jours).
CYCNOS	30 novembre 1988	18 TBq (durée 3 heures).
TECMESSA	20 mai 1989	20 TBq à partir du 27 mai (durée 42 jours).
CYZICOS	10 juin 1989	74 TBq, du 21 au 26 juin.
TÉLÈPHE	2 juin 1990	22 TBq, du 6 au 17 juin.
CYPSELOS	26 juin 1990	16 TBq.
HYRTACOS	14 novembre 1990	1,1 TBq.
MELANIPPE	7 mai 1991	130 TBq, du 13 mai au 15 juin.
CORONIS	5 juillet 1991	13 TBq, de 25 heures après l'essai au 23 juillet.

Les sorties gazeuses ou liquides pouvaient survenir de façon précoce, au moment de l'essai, ou plus tardivement, après la remise en eau de la cavité-cheminée. En effet, lors des essais souterrains, l'augmentation de la pression au moment de la formation de la cavité propulsait une faible quantité de gaz dans les câbles sectionnés lors de l'explosion. Ces gaz diffusaient ensuite dans les interstices remplis d'air des câbles de liaison entre le conteneur et la surface (rejets précoces). La remise en eau de la cavité y comprimait ensuite lentement les gaz et, du fait de leur faible solubilité, les poussait vers la surface. Ces fuites étaient qualifiées de différées et se produisaient souvent lors des opérations de post-forage. Le niveau d'activité des gaz était alors limité car ces opérations étaient réalisées tardivement, tandis que la cavité et la cheminée étaient remplies d'eau, réduisant notablement le risque de fuite lors du percement de la cavité. Lorsque le post-forage entrait dans la zone proche du point zéro, le fluide de forage se chargeait en éléments radioactifs.

Le principal radionucléide rejeté était ^{131}I dont les activités ont été quantifiées par les dispositifs de prélèvement de gaz et de mesure associés au système de contrôle radiologique mis en place lors de l'essai (Tableau 7 et cf. Chapitre III).

TABLEAU 7.
Bilan des principaux rejets d'iode enregistrés lors de la période des essais souterrains.

Essais souterrains	Date	Activité d'^{131}I rejetée (TBq)
HECTOR	26 novembre 1975	**0,1**
MÉNÉLAS	11 juillet 1976	**1,5**
OEDIPE	2 avril 1977	**0,35**
ORESTE	12 novembre 1977	**0,16**
POLYPHÈME	27 février 1978	**10**
LAERTE	25 novembre 1980	**6**
IPHICLÈS	28 mars 1981	**0,06**
ÉRYX	11 juillet 1981	**0,5**
DÉIPHOBE	24 février 1982	**0,22**
LAODICE	27 juin 1982	**0,06**
MIDAS	12 mai 1984	**0,12**
NAUPILOS	12 novembre 1986	**0,16**
JOCASTE	5 mai 1987	**1,4**
DIRCÉ	6 juin 1987	**0,15**
PASIPHAÉ	5 novembre 1987	**0,06**
PELÉE	19 novembre 1987	**0,06**
DANAÉ	29 novembre 1987	**0,09**
ACRISIOS	25 octobre 1988	**0,2**
MÉGAPENTHÈS	7 juin 1990	**0,1**

II.2.2.7 - TRANSFERT POTENTIEL À LA BIOSPHÈRE

Afin d'estimer l'exposition potentielle des populations polynésiennes aux rayonnements des radionucléides susceptibles d'être libérés à la suite des essais souterrains, les taux de relâchement des radionucléides, à partir des cavités-cheminées, ont fait l'objet d'études et d'évaluations détaillées (cf. Chapitre VII). Les expositions ont été calculées par les experts du CEA et de l'AIEA en fonction de différents scénarios, y compris les plus extrêmes qui correspondent à la perte de confinement de cavités, suivi de la libération des radionucléides dans les eaux océaniques et de leurs transferts dans les différentes composantes de l'environnement polynésien, selon des modalités décrites dans les paragraphes suivants.

II.3 - MÉCANISMES DE TRANSFERT DES RADIONUCLÉIDES

La connaissance des mécanismes de transfert des radionucléides dans l'environnement, en particulier les cinétiques d'échanges entre le terme source (essai nucléaire), les vecteurs physiques du biotope (air et eau) et les constituants de la biosphère (organismes vivants), était nécessaire afin d'apprécier l'impact sur l'environnement des essais nucléaires et d'en réduire les conséquences pour les populations, tant régionales que mondiales. Les processus de transfert des radionucléides mettent en jeu de nombreux mécanismes tels que la dispersion par advection-diffusion dans l'atmosphère et l'océan, l'adsorption-désorption avec les sols, les sédiments et les matières en suspension, l'accumulation-élimination dans les organismes vivants, etc., devant être précisés en fonction des caractéristiques des biotopes et des biocénoses des régions susceptibles d'être affectées par les essais. Les radionucléides sont ainsi transférés dans et entre les différents compartiments de l'environnement, atmosphère, eaux, sédiments, sols et organismes vivants qui peuvent constituer autant de termes sources secondaires que de sites de concentration et qui font l'objet d'une surveillance radiologique (Fig. 40).

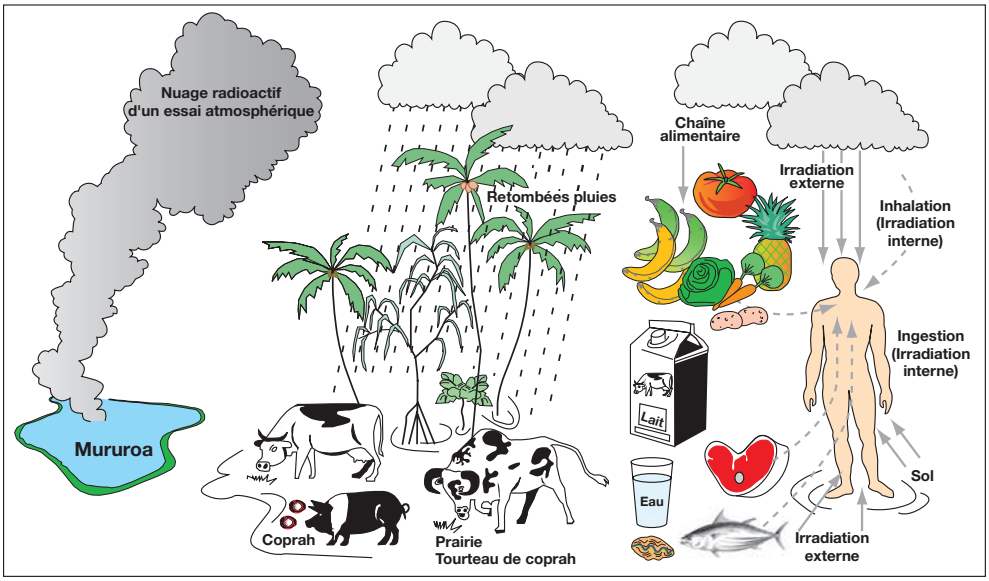


FIG. 40. - Voies de transfert simplifiées des radionucléides dans l'environnement, depuis leur libération lors d'une explosion nucléaire jusqu'aux produits des chaînes alimentaires conduisant à l'Homme.

Les principaux transferts au sein des biotopes et biocénoses sont sommairement rappelés dans ce chapitre afin de faciliter la compréhension du choix des indicateurs surveillés dans l'environnement (cf. Chapitre III) et d'apprécier les risques pour les travailleurs des sites d'expérimentations et pour les populations vivant en Polynésie (cf. Chapitres VI et VII).

II.3.1 - DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE DES RADIONUCLÉIDES

Lors des essais atmosphériques, dès la formation du nuage radioactif stabilisé, les radionucléides subissaient un processus de dispersion qui, suivant leur trajectoire et leur période radioactive, pouvait les amener à intégrer les différentes composantes de l'environnement. Deux classes de trajectoires du nuage étaient alors envisagées, celles provoquant la dispersion des radionucléides dans la troposphère et celles contribuant à leur dissémination dans la stratosphère.

II.3.1.1 - TRAJECTOIRES

Lors des essais atmosphériques réalisés dans la troposphère tropicale de l'hémisphère Sud, les masses d'air susceptibles d'être en contact avec le nuage radioactif étaient soumises à la circulation générale dominante d'ouest en est, en limite Sud de la série zonale de noyaux anticycloniques (cf. Chapitre I). Ainsi, le transport des radionucléides suivant des trajectoires troposphériques pouvait être schématisé comme suit :

- Un nuage principal suivait, à basse altitude sous l'effet des alizés, une trajectoire initiale vers l'ouest, s'inversant vers l'est du fait de la circulation d'ouest en est aux plus hautes altitudes.
- Des nuages secondaires se détachaient rapidement du nuage principal et se dispersaient vers le nord, entre les différents noyaux anticycloniques. Leurs trajectoires conduisaient à des retours de masses d'air contaminées vers l'ouest, ou favorisaient le passage des radionucléides de l'hémisphère Sud vers l'hémisphère Nord, dans le cas où des conditions météorologiques favorables à ces transferts existaient au nord de l'équateur (dépressions, moussons).

Dans le cas des essais souterrains, les éventuels rejets atmosphériques à la surface du platier, ou des eaux du lagon, lors des opérations de post-forage concernaient les couches les plus basses de la troposphère et leur dispersion dépendait essentiellement des conditions météorologiques locales au sol, en particulier de l'influence des alizés.

Lors des essais atmosphériques de puissance mégatonnique, la majorité des produits de fission étaient injectés dans la stratosphère, où la circulation générale des masses d'air diffère de celle rencontrée dans la troposphère. En effet, la tropopause est le lieu d'une discontinuité du gradient thermique vertical, entraînant une discontinuité dans la diffusion des particules radioactives. La stabilité thermique verticale stratosphérique conduit à une circulation des masses d'air quasi horizontale, mise en évidence par la configuration des surfaces isentropiques (surfaces de température potentielle constante) qui contraste avec les turbulences troposphériques. Les radionucléides suivaient alors des trajectoires stratosphériques et restaient confinés dans le compartiment stratosphérique (Fig. 41). Ce dernier était considéré comme un réservoir dans lequel l'activité des radionucléides allait diminuer, lentement par décroissance radioactive, par dispersion jusque dans l'hémisphère Nord et enfin par sédimentation lente des particules, en fonction de l'intensité des échanges avec la troposphère.

Les essais en altitude ont conduit à réduire drastiquement la fraction des particules les plus lourdes lors de l'explosion et à limiter l'injection dans la stratosphère aux particules extrêmement fines. Le passage aux essais sous ballon a donc eu pour conséquence de limiter les retombées tant locales que régionales en Polynésie comme cela est décrit dans les paragraphes suivants. En fonction de l'altitude de leur injection dans l'atmosphère, le temps de résidence des produits radioactifs changeait d'échelle ; de quelques jours à un ou deux mois dans la troposphère, le temps de résidence variait pour les essais sous ballon de plusieurs mois à un ou deux ans dans la stratosphère.

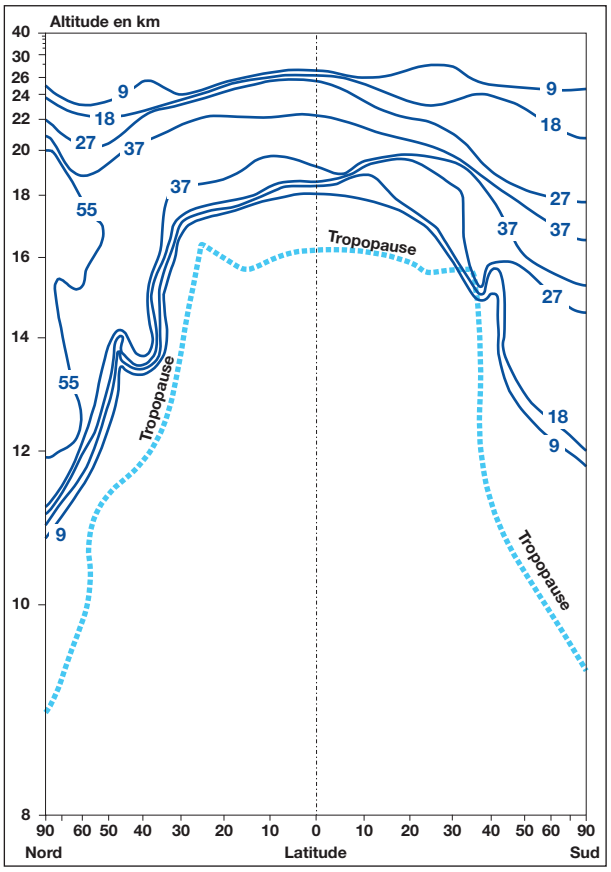


FIG. 41. - Évolution de l'activité volumique (mBq.m^{-3}) en ^{137}Cs mesurée, le 25 mai 1971, dans la stratosphère des deux hémisphères. Les activités volumiques maximales sont mesurées aux plus hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

II.3.1.2 - RETOMBÉES RADIOACTIVES

D'une manière générale, les débris radioactifs résultant d'essais nucléaires atmosphériques se répartissaient entre la surface du sol et/ou de l'eau des sites d'expérimentations et les compartiments troposphérique et stratosphérique, en fonction du type, de l'altitude et de l'emplacement des essais, ainsi que de l'énergie dégagée lors des explosions. Les débris sédimentant sous forme de particules vers la surface de la Terre sont appelés retombées atmosphériques.

- **Les retombées locales** pouvaient représenter jusqu'à 50 % des retombées produites dans le cas des essais pratiqués à faible altitude et au sol (cette proportion a été moindre dans le cas des essais français). Elles se composaient des matières radioactives particulaires qui se déposaient dans un rayon d'environ 100 km autour du site d'essai.
- **Les retombées troposphériques** se composaient d'aérosols de plus petit diamètre se déposant après un temps de séjour moyen de 30 jours. Au cours de cette période, les débris se dispersaient dans une bande de latitude centrée sur celle où ils avaient été injectés, en suivant des trajectoires régies par le régime des vents. Du point de vue de l'exposition, les retombées troposphériques dominantes étaient celles impliquant les radionucléides ayant une période de quelques jours à deux mois comme ^{131}I, ^{140}Ba et ^{85}Sr.
- **Les retombées stratosphériques**, qui formaient une grande partie des retombées totales, donnaient lieu, ultérieurement, aux retombées mondiales. Les retombées stratosphériques étaient à l'origine de la majeure partie des résidus mondiaux en ^{238}Pu, ^{239}Pu et ^{240}Pu ainsi que des produits de fission de longue période, comme le ^{137}Cs et le ^{90}Sr.

Dans le cas des sites de Mururoa et Fangataufa, les trajectoires des nuages décrites précédemment, expliquent le tracé de l'axe principal des retombées proches qui, après avoir suivi une direction ouest, s'inversait rapidement vers l'est. En effet, la partie inférieure du pied du nuage radioactif était poussée vers l'ouest par les alizés venant de l'est. En revanche, les vents s'orientant vers l'est en altitude durant l'hiver austral, la tête du nuage était entraînée dans la direction opposée. Suivant la direction des vents dans les couches intermédiaires, le déplacement de la tête des nuages suivait un axe principal orienté soit vers le nord, soit vers le sud du point zéro de l'explosion (Fig. 42).

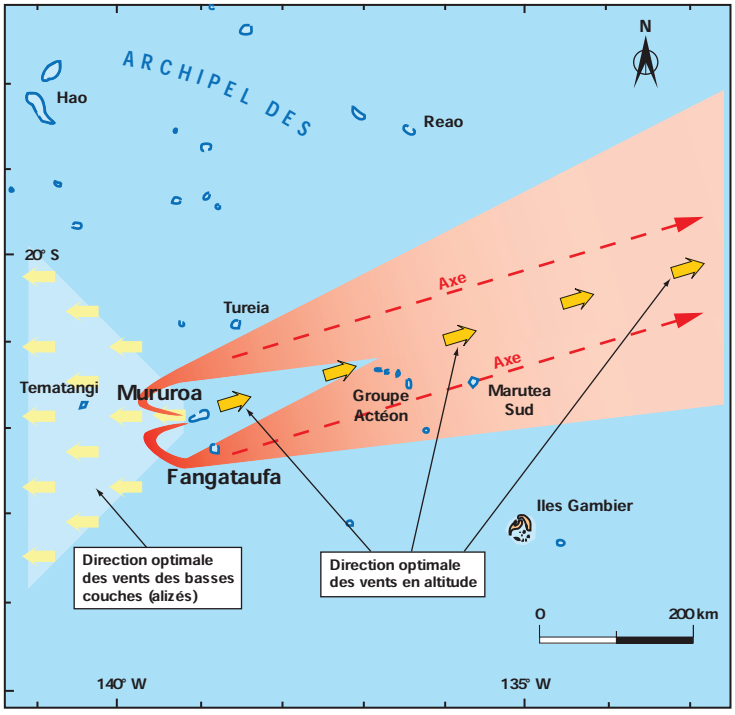


FIG. 42. - Exemples de retombées proches au niveau de la mer lors des conditions météorologiques optimales pour réaliser un essai atmosphérique sur les sites du CEP.

Les différentes retombées ont conduit à des dépôts de radionucléides à la surface de l'eau et des sols ; localement, sur les sites d'expérimentations, avec des retombées immédiatement après l'essai et, sur l'ensemble du globe essentiellement aux mêmes latitudes, avec des retombées troposphériques, à plus long terme.

Les retombées stratosphériques, quant à elles, ont concerné l'ensemble de la planète. Produites par les essais atmosphériques effectués principalement par les États-Unis et l'URSS durant la décennie précédant la réalisation des essais au CEP, elles expliquent les niveaux d'activité mesurés en 1962 dans l'environnement polynésien (cf. Chapitre V). En effet, un quart environ des retombées associées aux essais nucléaires atmosphériques s'est déposé dans l'hémisphère opposé à celui où l'essai avait eu lieu. Les niveaux des retombées les plus élevés ont été observés aux latitudes moyennes de chaque hémisphère.

II.3.1.3 - VITESSE DE DÉPÔT

Les dépôts de radionucléides à la surface du globe se produisaient sous forme de dépôt sec par captation des radionucléides au contact de l'air contaminé, et sous forme de dépôt humide par lessivage de la masse d'air par les pluies. L'intensité du dépôt sec dépendait des turbulences au niveau du sol et celle du dépôt humide était proportionnelle à l'importance des précipitations. La vitesse du dépôt humide pouvait dépasser 0,1 $m.s^{-1}$ alors que celle plus faible du dépôt sec variait entre 1.10^{-4} et 2.10^{-3} $m.s^{-1}$. Les radionucléides déposés sur les sols et les sédiments peuvent être caractérisés par leur activité surfacique ($Bq.m^{-2}$) ou massique ($Bq.kg^{-1}$ de sols ou de sédiments secs).

Les dépôts en milieu terrestre conduisaient à la contamination surfacique, entre autres, des sols et des végétaux. Les sols polynésiens, en général, ne dépassent pas quelques dizaines de centimètres d'épaisseur (cf. Chapitres I et III). Différents processus naturels (accumulation, érosion, lixiviation) interviennent pour contrôler l'évolution au cours du temps de l'activité des radionucléides initialement présents dans les sols. Les radionucléides qui se déposaient à la surface des masses d'eaux superficielles subissaient quant à eux un nouveau processus de dispersion par advection-diffusion par les courants marins de l'océan Pacifique (cf. Chapitre I) et migraient progressivement dans toute la colonne d'eau conduisant progressivement à leur dilution. Les radionucléides interagissant avec les matières en suspension (MES) sédimentaient plus rapidement et s'accumulaient dans les sédiments, soit localement dans les lagons des sites d'expérimentations, soit dans les grands fonds de cette partie de l'océan Pacifique.

Les remises en suspension des dépôts, sur le sol ou les sédiments, pouvaient conduire à des augmentations locales de l'activité volumique de l'atmosphère ou des eaux des lagons. L'intensité de la remise en suspension dépendait de la turbulence locale due aux vents ou aux courants et de la taille des particules. Le rapport entre l'activité volumique de l'air à un mètre au-dessus du sol, ou de l'eau au-dessus des sédiments, et l'activité surfacique détermine le facteur de remise en suspension.

II.3.1.4 - PRÉVISIONS DES RETOMBÉES PROCHES

Les prévisions des retombées des essais atmosphériques susceptibles de conduire à des dépôts étaient établies à l'aide d'un modèle mathématique décrivant le nuage initial stabilisé sous la forme de trois cylindres coaxiaux représentant la tête, la jupe et le pied d'un nuage nucléaire (Fig. 28). Les rayons et hauteurs des cylindres dépendaient de l'énergie de l'essai et de l'état de l'atmosphère. L'activité des cylindres était calculée en adoptant la loi de distribution de la radioactivité en fonction de l'altitude réduite Z/Zs décrite précédemment pour le nuage stabilisé (Fig. 29). La distribution de l'activité de l'ensemble des particules contenues dans les cylindres était ensuite modélisée, suivant le type d'engin expérimenté, et l'évolution de l'activité au cours du temps pouvait être calculée. Pour ce faire, les cylindres décrivant le nuage initial étaient décomposés en un empilement de tranches horizontales (10 à 30 selon l'énergie), de quelques centaines à un millier de mètres d'épaisseur chacune. Chaque tranche était ensuite dupliquée pour décrire le comportement de chacune des classes de particules associées au nuage. Chaque classe de particules était caractérisée par une vitesse de chute spécifique. La distribution de particules radioactives comportait jusqu'à 50 classes, réparties dans 20 tranches différentes, de sorte que le nombre de tranches de particules à traiter était de l'ordre du millier (Fig. 43).

Le transport des particules était ensuite simulé par le déplacement des tranches de particules jusqu'à leur point de chute, sous les effets combinés des vents (direction et vitesse) et de la gravité (vitesse de chute). Les calculs étaient réalisés pour un réseau de cellules d'une centaine de kilomètres de côté et d'une hauteur de quelques centaines à un millier de mètres. Les effets de la diffusion turbulente étaient modélisés en appliquant une loi de dilatation horizontale à la tranche de particules, à son arrivée à la surface du sol ou de l'eau. L'expansion de chaque tranche de particules était exprimée par le calcul de son rayon à l'instant de son arrivée à la surface (R_t), au moyen de la formule suivante :

$$R_t = R_O + 2,4.t$$

avec :

$\mathbf{R_O}$ le rayon initial et **t** la durée du déplacement de chaque tranche de l'explosion jusqu'au contact avec la surface du sol ou de l'eau.

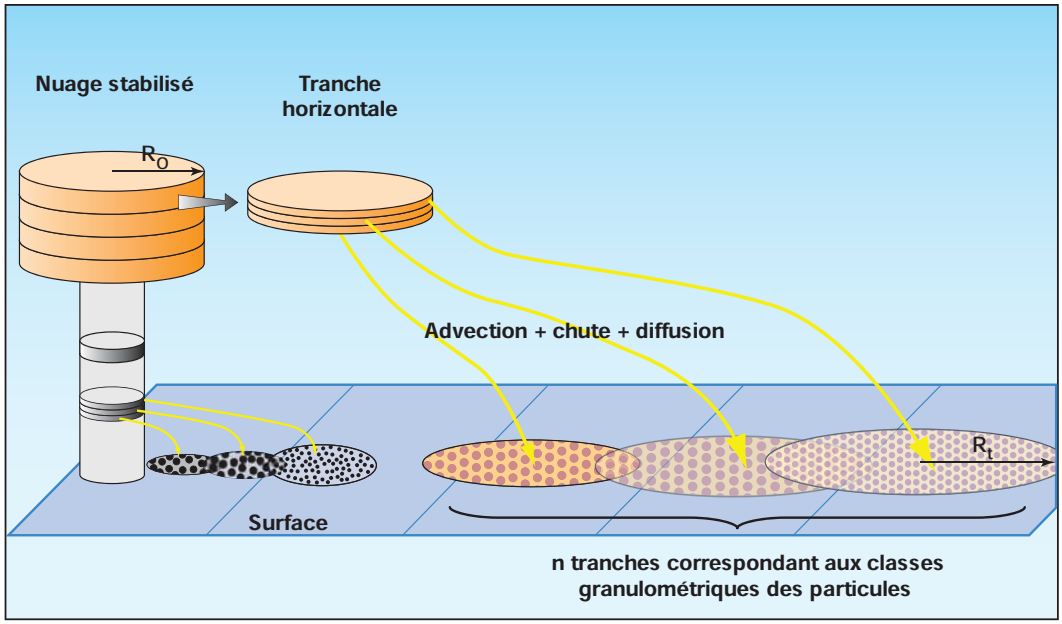


FIG. 43. - Principe du code de calcul opérationnel utilisé pour réaliser les prévisions des retombées en Polynésie.

Les cartes prévisionnelles des activités volumiques et surfaciques, des débits de dose en fonction du temps étaient réalisées en additionnant, en un grand nombre de points, les contributions de l'ensemble des tranches de particules. Des courbes étaient tracées pour estimer les niveaux des retombées, en fonction du temps et de l'espace :

- les courbes d'iso-débit de dose, donnant la prévision du débit de dose maximal, en différents points suivant le déplacement du nuage ;
- les isochrones, donnant l'heure d'arrivée des retombées au sol.

Afin de comparer les prévisions au cours du temps, les contours des retombées étaient exprimés par les activités et les débits de dose des produits de fission du mélange, ramenés, par convention, 1 heure après l'essai (H+1). La valeur réelle du débit de dose, au moment des retombées, pouvait être calculée en chaque point, en corrigeant la valeur de la courbe par la décroissance radioactive en $t^{-1,2}$, entre H+1 et l'heure d'arrivée de la retombée qui était donnée par l'isochrone.

II.3.2 - ÉVOLUTION DES DÉPÔTS

Les relations entre les radionucléides déposés par les retombées sur les sols et les sédiments sont évaluées au moyen de coefficients de distribution (Kd, exprimé en $l.kg^{-1}$). Le Kd est défini par le rapport des activités massiques de la phase particulaire sur la phase dissoute du sol (ou des sédiments), à l'équilibre, suivant la formule :

$$Kd = A_p / A_d$$

avec :

A_p : activité massique de la phase solide du sol en $Bq.kg^{-1}$ sec ;
A_d : activité volumique de la phase aqueuse extraite du sol en $Bq.l^{-1}$.

En règle générale, la valeur du Kd associée à un radionucléide, pour un même type de sol, croît avec l'augmentation de la proportion d'argile et la diminution de la taille des particules le constituant. Ce paramètre permet de comparer le comportement des radionucléides dans les sols : ceux caractérisés par une valeur de Kd élevée sont considérés comme peu mobiles, alors que ceux ayant une valeur de Kd faible, comme le Sr, migrent plus rapidement vers les horizons inférieurs des sols et sont plus facilement transférés aux végétaux. Cependant, pour un même type de sol, les valeurs proposées dans la littérature scientifique pour un radionucléide donné apparaissent fortement dispersées (Tableau 8).

TABLEAU 8.
Variation des valeurs de Kd observée sur différents types de sol standards.

Type de sol		Sable	Limon	Argile	Organique
Cs	*Valeur la plus probable*	**270**	**4400**	**1800**	**270**
	Intervalle observé	**18-40000**	**330-60000**	**74-2000**	**0,2-360000**
I	*Valeur la plus probable*	**1**	**4,5**	**180**	**27**
	Intervalle observé	**0,013-85**	**0,082-240**	**0,082-33**	**0,5-1500**
Sr	*Valeur la plus probable*	**13**	**20**	**110**	**150**
	Intervalle observé	**55-330**	**0,67-600**	**2-6000**	**4,5-5400**

La vitesse de migration des radionucléides est fonction de leurs propriétés chimiques, de la perméabilité et de la capacité de rétention des sols. Les vitesses de migration sont en général faibles, même pour des éléments considérés comme mobiles, tel le strontium dont la vitesse de migration est inférieure à 1 cm.an^{-1}.

En mer, les matières en suspension (MES) et les sédiments sont, respectivement, des vecteurs de transfert et des lieux de stockage très importants. Comme pour les sols, les valeurs de Kd pour un même radionucléides sont très variables et leur détermination repose sur une approche statique. Celle-ci montre que des radionucléides comme le plutonium ou le cobalt ont une forte affinité pour les sédiments avec respectivement des Kd de l'ordre de 100 000 et de 40 000. Les sédiments ont accumulé les radionucléides au moment où l'activité de l'eau de mer était la plus élevée. Les sédiments abyssaux qui ne sont généralement pas soumis à des remobilisations constituent un terme «puits» pour les radionucléides qui sont mis hors de portée des organismes vivants par enfouissement progressif. En revanche, les sédiments des régions côtières, peu profondes, sont susceptibles d'être remis en suspension et sont considérés comme des sources secondaires différées de radionucléides pour les eaux de mer.

II.3.3 - TRANSFERT AUX ORGANISMES VIVANTS

L'accumulation des radionucléides par les organismes vivants peut se faire par l'intermédiaire de différents vecteurs : l'air et les aérosols, l'eau et les MES, les sols et sédiments, ainsi que par leur nourriture. Deux phénomènes sont impliqués dans l'accumulation des radionucléides par les organismes vivants : l'adsorption et l'absorption (Fig. 44). L'adsorption conduit à un marquage exteme de l'organisme (surface des feuilles, des coquilles, etc.). Au contraire, l'absorption correspond au passage des radionucléides à travers les membranes biologiques. Leurs voies de pénétration dans les organismes sont pulmonaires, branchiales, tégumentaires (absorption directe à partir de l'eau) et digestives (absorption suite à l'ingestion de nourriture contenant des radionucléides). Les radionucléides sont ensuite véhiculés, par la sève chez les végétaux et par le sang chez les animaux, entre les différents organes par des mécanismes de translocation. Ils peuvent alors se concentrer

dans des organes ou tissus cibles (fruit, graine, muscle, glande digestive, squelette, etc.) de façon variable suivant leur forme physico-chimique et en fonction du métabolisme de l'organisme.

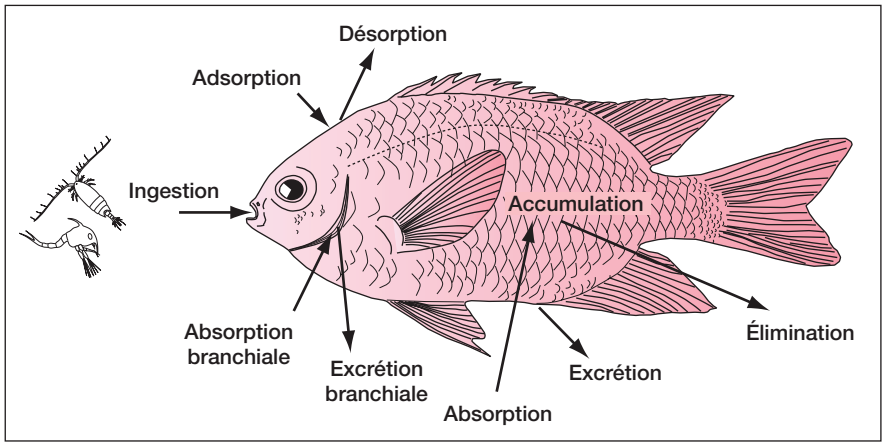


Fig. 44. - Principaux mécanismes conduisant à la contamination des organismes marins par des radionucléides d'origines naturelle et artificielle.

L'accumulation des radionucléides résulte d'un bilan positif entre les mécanismes d'incorporation (contamination) et de désorption (décontamination), en tenant compte de la décroissance de l'activité, fonction de la période radioactive des radionucléides considérés. Pour chaque organisme vivant, la cinétique de la décroissance de l'activité d'un radionucléide particulier peut être appréciée à l'aide de la période effective (T_e), calculée par la formule suivante :

$$T_e = (T_b \cdot T_p) / (T_b + T_p)$$

avec :

T_p : la période radioactive du radionucléide considéré ;

T_b : la période biologique qui est le temps nécessaire pour qu'un organisme ou un organe perde la moitié de son activité pour le radionucléide considéré.

Cette valeur T_e sera précisée pour les différents radionucléides, dans les chapitres IV et V présentant les résultats de la surveillance environnementale des organismes vivants, afin d'être comparée à la valeur de leur période radioactive (T_p).

Le transfert des radionucléides aux organismes vivants affecte en premier lieu les producteurs primaires (plantes), puis les organismes herbivores. Ainsi, intégrés aux premiers maillons des réseaux trophiques, les radionucléides pourront éventuellement être transférés aux niveaux trophiques supérieurs. L'activité de la plupart des radionucléides décroît au fur et à mesure que l'on s'élève dans les niveaux trophiques, des producteurs photosynthétiques aux herbivores, puis aux carnivores. Les mécanismes en jeu dans ces transferts sont nombreux. Des modèles ont été mis au point à partir des résultats de travaux expérimentaux menés en laboratoire et d'observations sur le terrain représentatives du fonctionnement des écosystèmes terrestres et marins, afin d'évaluer la répartition spatio-temporelle des radionucléides dans les différents compartiments physiques et biologiques.

II.3.3.1 - VÉGÉTAUX TERRESTRES

Les radionucléides peuvent intégrer les végétaux directement, par voie foliaire, et indirectement, après dépôt sur le sol, par voie racinaire. Les radionucléides absorbés à travers l'épiderme foliaire ou racinaire font ensuite l'objet de mécanismes de translocation, au sein du végétal, qui les redistribuent dans des organes initialement exempts de toute activité. La translocation peut conduire à l'accumulation de certains radionucléides dans des organes particuliers. Par exemple, il a été observé dans les îles du Pacifique que le ^{137}Cs est systématiquement à des niveaux d'activité massique plus élevés dans le coprah que dans le lait issu des mêmes noix de coco (cf. Chapitre IV).

Comme pour les sols, à la suite des essais atmosphériques, l'activité surfacique des plantes résultait de dépôts secs ou humides lors des pluies. La biomasse et les caractéristiques du feuillage des végétaux, au moment du dépôt, définissent la valeur du facteur d'interception (μ en $m^2.kg^{-1}$ sec) des radionucléides. Pour l'herbe, la fraction initiale (f) interceptée au moment du dépôt était calculée généralement de la manière suivante :

$$f = 1 - e^{-\mu.B}$$

avec: **B** le rendement de la biomasse des parties aériennes des plantes en $kg.m^{-2}$ (exprimé en poids sec).

La valeur du facteur d'interception est de 100 % pour une prairie et de l'ordre de 60 à 80 % pour les autres plantes au stade de la maturité.

Les radionucléides initialement déposés pouvaient ensuite être soumis à divers processus qui favorisaient leur élimination, tels le lessivage du dépôt par les pluies ou l'arrosage, l'élimination de particules radioactives par le vent, la chute des feuilles. L'ensemble de ces pertes et la décroissance physique des radionucléides a conduit à définir des périodes effectives spécifiques des différents radionucléides et des végétaux. En revanche, les phénomènes de remise en suspension des dépôts au sol pouvaient contribuer à l'activité des parties foliaires, par redéposition et adsorption des particules radioactives sur les parties aériennes des végétaux (Fig. 45).

L'estimation du transfert foliaire des radionucléides nécessite le calcul d'un facteur qui est le rapport de l'activité massique du végétal ($Bq.kg^{-1}$) au moment de la récolte sur l'activité surfacique totale déposée ($Bq.m^{-2}$). Ainsi, l'activité massique des radionucléides (A_c en $Bq.kg^{-1}$ frais), dans la partie consommable du végétal à la récolte au temps tr, peut être calculée à partir de la vitesse de dépôt, sec ou humide, des radionucléides (D en $Bq.m^{-2}.s^{-1}$), des facteurs d'interception (F_i), de translocation (F_{tr}), du rendement de culture (R_t) et de la période effective T_e (s^{-1}) en utilisant la formule suivante :

$$A_c = \int_a^{tr} \frac{D.F_i.F_{tr}}{R_t} (e^{T_e t}) dt$$

Le facteur de translocation est égal à 1 lorsque la partie consommable est constituée par la masse foliaire des légumes-feuilles, comme la salade. Il se situe entre 0,1 et 0,15 pour les autres légumes-racines.

Les radionucléides initialement déposés sur le sol par les retombées peuvent également être transférés aux végétaux par voie racinaire. L'intensité de ces transferts racinaires dépendait du radionucléide, de l'espèce végétale et du type de sol (granulométrie, structure, composition organique, teneurs en éléments stables, pH, concentrations en acides humiques et fulviques et des amendements agricoles pratiqués). Le principal facteur régissant la biodisponibilité des radionucléides est leur solubilité dans la phase liquide des sols.

Ainsi, les végétaux n'absorbent par voie racinaire qu'une très faible fraction des actinides présents dans les sols. Les facteurs de transfert racinaire se situent entre 10^{-3} et 10^{-6}, du neptunium à l'américium, au curium et au plutonium.

L'intensité des transferts racinaires est appréciée à travers les valeurs du facteur de transfert racinaire (F_r), définit comme le rapport entre l'activité massique du végétal (A_v en $Bq.kg^{-1}$) et celle du sol (A_s en $Bq.kg^{-1}$ sol sec), considérée comme homogène et constante pendant la durée de croissance du végétal. À partir du dépôt, la fraction de l'activité d'un végétal due aux transferts racinaires est calculée en utilisant la formule suivante :

$$A_v = F_r \times A_s$$

À la suite des retombées atmosphériques, l'absorption foliaire était la voie de transfert la plus importante, à court terme chez les végétaux terrestres. Le sol constituait un réservoir de radionucléides qui, suivant leur période radioactive et leur mobilité, s'incorporaient, à plus ou moins long terme, par transfert racinaire dans les plantes.

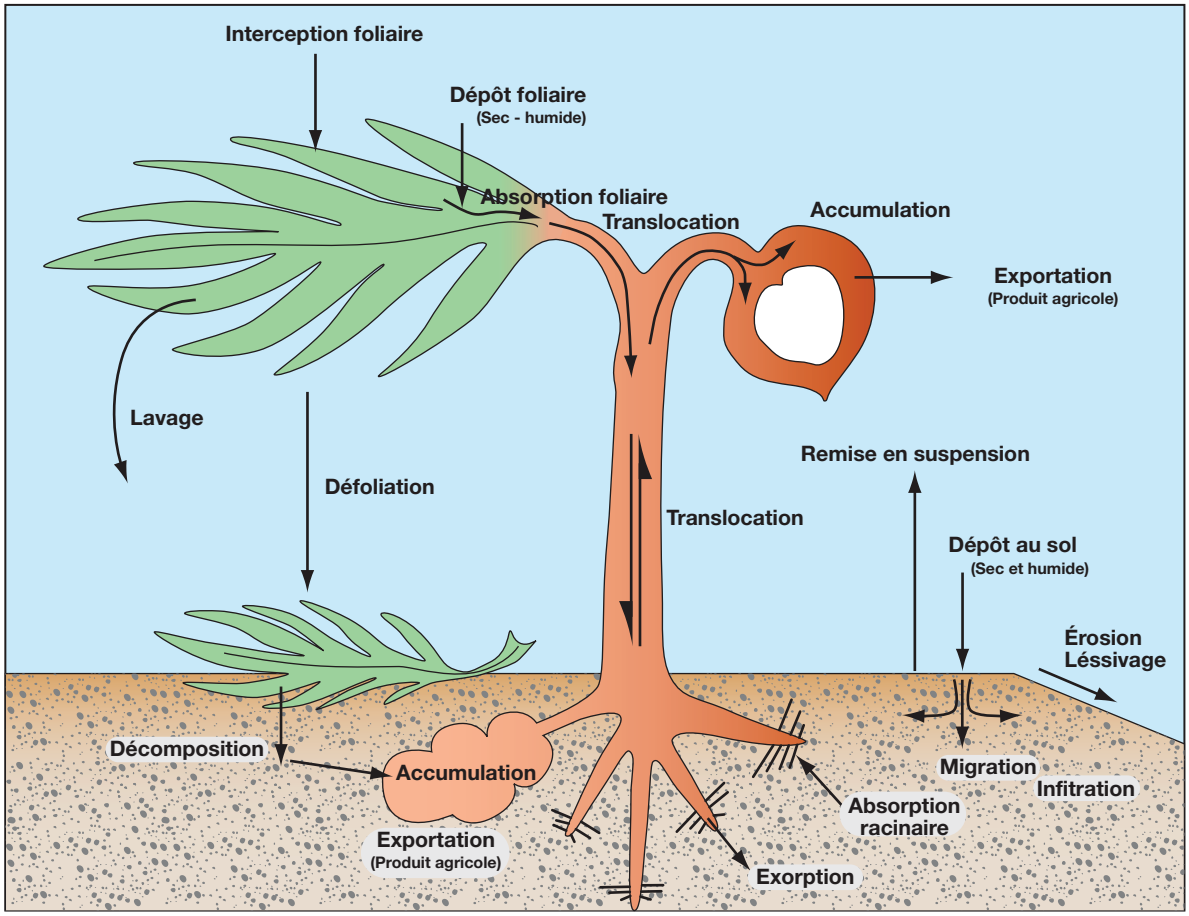


Fig 45. - Schéma des principaux mécanismes en jeu lors de la contamination des sols et des végétaux terrestres par des retombées atmosphériques.

II.3.3.2 - ANIMAUX D'ÉLEVAGE

Les radionucléides présents dans les végétaux peuvent être transférés aux espèces herbivores par ingestion. Après absorption, les radionucléides véhiculés par le sang sont distribués dans tout l'organisme, d'où ils peuvent être éliminés rapidement, ou se fixer et s'accumuler dans certains organes cibles. Ainsi, les isotopes de l'iode se fixent dans la thyroïde, ceux du césium dans les muscles et ceux du plutonium dans le foie. Ils se concentrent également dans les productions animales, par exemple, l'iode dans le lait, le chlore dans les oeufs, etc.

Le facteur de transfert aux productions animales est le rapport entre la concentration du radionucléide dans un produit animal ($Bq.kg^{-1}$) et sa concentration dans la ration de l'animal ($Bq.jour^{-1}$). Ce facteur est en général inférieur à 1, ce qui signifie qu'il y a toujours dilution de l'activité à chaque niveau du réseau trophique ou de la chaîne alimentaire conduisant à l'Homme (Tableau 9).

TABLEAU 9.
Valeurs de facteurs de transfert ($jour.kg^{-1}$ frais) aux principales productions animales de différents radionucléides.

Production animale	Iode	Césium	Strontium	Américium Plutonium
Lait bovin	1.10^{-2}	5.10^{-2}	2.10^{-3}	1.10^{-5}
Lait ovin	3.10^{-1}	1.10^{-1}	5.10^{-2}	1.10^{-4}
Viande bovine	3.10^{-3}	5.10^{-2}	8.10^{-3}	2.10^{-4}
Viande ovine	6.10^{-3}	3.10^{-1}	4.10^{-2}	1.10^{-3}
Viande porc	4.10^{-3}	2.10^{-1}	4.10^{-2}	1.10^{-3}
Viande volaille	2.10^{-1}	5	4.10^{-2}	1.10^{-1}
Oeufs volaille	3	5.10^{-1}	3.10^{-1}	9.10^{-3}

II.3.3.3 - ORGANISMES MARINS

Après dépôt à la surface des océans, les radionucléides s'homogénéisent progressivement dans les masses d'eau et entrent en contact avec les organismes marins. Les sédiments sont également des sources secondaires de transfert de radionucléides aux organismes vivant à leur contact. Dans tous les cas, les transferts de radionucléides aux organismes marins peuvent avoir lieu directement à partir de l'eau, par absorption des radionucléides à travers les téguments et l'épithélium branchial, et indirectement, par l'ingestion de nourriture contenant des radionucléides (Fig. 46). La contribution relative de chacune des deux voies de transfert à l'activité totale d'un organisme ou d'un organe varie suivant les radionucléides et est modulée en fonction des cycles saisonniers d'alimentation des espèces. Ainsi, par exemple, chez les poissons, le transfert en ^{137}Cs ou ^{110m}Ag par la nourriture est plus important que le transfert direct à partir de l'eau. En revanche, pour le ^{60}Co, l'absorption à partir de l'eau est le mécanisme de transfert principal.

À l'état d'équilibre, c'est-à-dire lorsque les eaux de mer sont à un niveau d'activité volumique constant, l'ensemble des transferts aux organismes marins peut être évalué à l'aide d'un facteur de concentration (Fc), entre les deux compartiments eaux et organisme. Le Fc ($l.kg^{-1}$) est le rapport de l'activité massique d'un organisme (A_p en $Bq.kg^{-1}$ frais) sur l'activité volumique des eaux marines (A_{em} en $Bq.kg^{-1}$). Le Fc caractéristique de chaque couple radionucléide-organisme est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$Fc = A_p / A_{em}$$

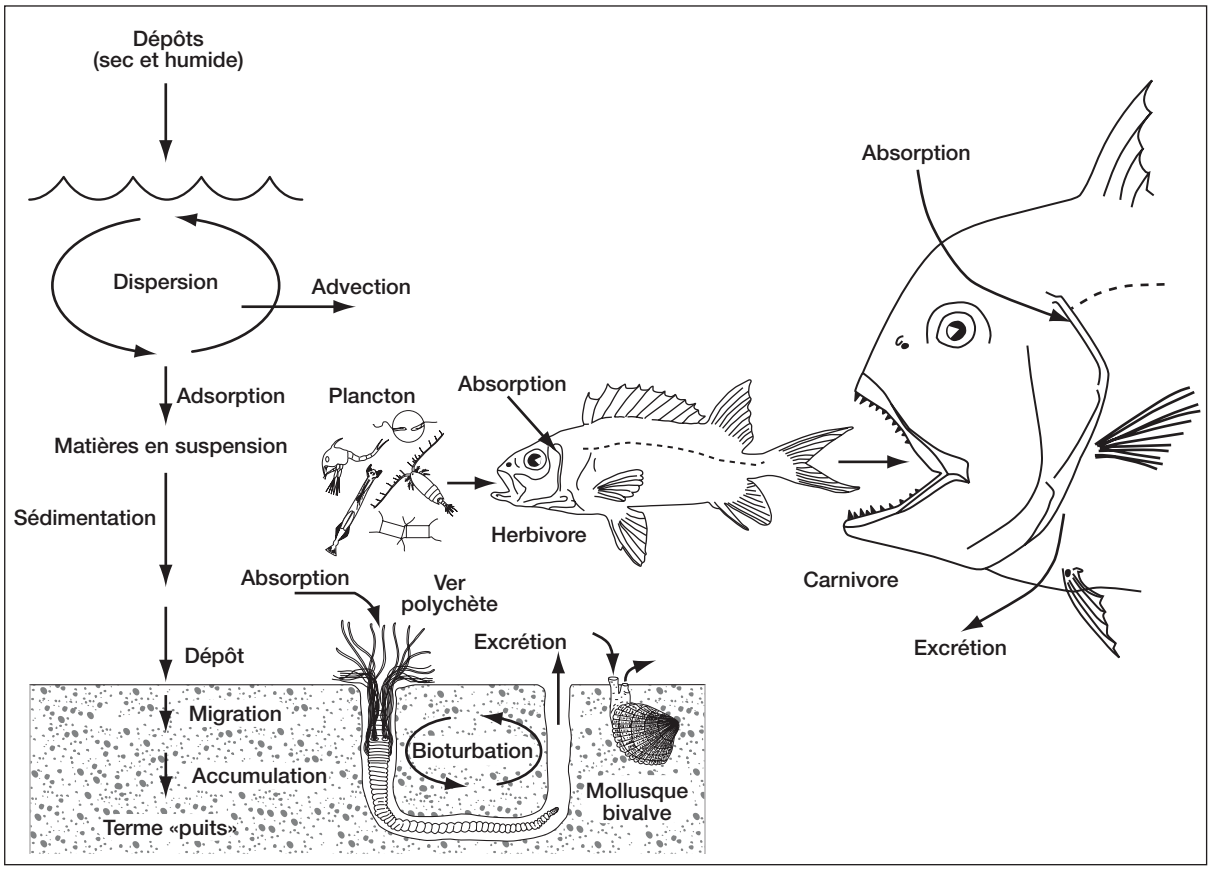


Fig 46 - Schéma des principaux mécanismes de transfert des radionucléides en domaine marin.

En général, les facteurs de concentration à l'équilibre sont d'autant plus faibles que le niveau d'organisation cellulaire de l'organisme considéré est élevé. Les Fc les plus élevés sont observés chez les espèces appartenant aux producteurs primaires, phytoplancton, algues benthiques brunes en particulier, avec des Fc supérieurs à 1 000 pour la plupart des radionucléides. Ces valeurs soulignent l'importance des algues dans le transfert des radionucléides aux niveaux supérieurs des réseaux trophiques. Ainsi, les mollusques filtreurs se nourrissant essentiellement de plancton et de MES, comme le bénitier ou la nacre, incorporent rapidement les radionucléides présents dans les masses d'eau. Il en va de même pour le turbo ou le troca, qui sont des mollusques brouteurs du tapis algal se développant sur les substrats coralliens.

C'est pourquoi, depuis la mise en place d'une surveillance radiologique de l'environnement marin en Polynésie, devant la difficulté à collecter des masses suffisantes d'algues pour la mesure, ces espèces de mollusques sont utilisées comme des bioindicateurs, sentinelles de la variation éventuelle des niveaux d'activité des eaux de mer. En outre, ils accumulent un grand nombre de radionucléides au niveau de leur hépatopancréas, par translocation, et par adsorption directe sur leur coquille, à partir de l'eau de mer. Les valeurs de Fc associées sont élevées. Ainsi, l'AIEA recommande l'utilisation d'un facteur 500 000 pour le fer, 20 000 pour le cobalt et 3 000 pour le plutonium, afin d'estimer leur transfert à partir de l'eau de mer.

En règle générale, les Fc associés aux différents radionucléides sont d'autant plus élevés que l'élément est essentiel du point de vue biologique, comme le zinc et le manganèse qui sont des activateurs de nombreux enzymes et des constituants des métalloprotéines (Tableau 10).

TABLEAU 10.
Valeur recommandée pour les valeurs de Fc utilisées pour estimer les niveaux de contamination de différentes familles d'organismes marins à partir de l'activité volumique des eaux de mer (AIEA - Tec Report n°422).

Éléments	Phytoplancton	Mollusques	Crustacés	Poissons
Co	2 000	20 000	7 000	700
Ni	3 000	2 000	1 000	1 000
Zn	10 000	80 000	30 000	1 000
Cs	20	60	50	100
Sr	1	10	5	3
I	800	10	3	9
U	20	30	10	1
Pu	200 000	3 000	200	100
Am	200 000	1 000	400	100

II.4 - CONCLUSION

Une explosion nucléaire libère, en un temps très court, un grand nombre de radionucléides aux caractéristiques physico-chimiques différentes. Dans le cadre des essais nucléaires, l'ensemble de ces radionucléides formaient un mélange initial caractéristique, dont l'activité bêta globale diminuait suivant la période radioactive de chaque isotope radioactif. Les radionucléides générés par ces explosions étaient majoritairement caractérisés par des périodes radioactives courtes qui les amenaient à disparaître très rapidement.

Lors des essais atmosphériques, les radionucléides caractérisés par les périodes radioactives les plus longues ont été dispersés au cours du temps, au sein des différentes composantes de l'environnement, où différents facteurs naturels ont modifié leur répartition théorique initiale. Ainsi, lors des quatre essais atmosphériques sur barge, les radionucléides ont principalement été émis dans la troposphère, les eaux de mer et les sédiments du lagon. Par la suite, les essais atmosphériques sous ballon générant des particules plus fines, de taille inférieure à 50 µm, les radionucléides associés à ces particules ont été injectés dans la stratosphère, limitant ainsi les retombées locales à la surface des eaux de mer et des sols polynésiens.

Les essais souterrains ont conduit au confinement initial de la plus grande partie des radionucléides au sein des cavités-cheminées formées par les explosions. Les transferts à la biosphère *via* l'atmosphère ont donc été très limités et localisés à l'environnement des sites expérimentaux. Cependant, les radionucléides ayant les périodes radioactives les plus longues piégés dans les laves, restent une source potentielle d'émission vers la biosphère, en particulier en cas de rupture du confinement.

La connaissance des composantes physique et biologique et la compréhension du fonctionnement des écosystèmes des atolls polynésiens ont permis d'adapter les améliorations technologiques aux caractéristiques des sites pour progressivement réduire les émissions de radionucléides dans l'environnement polynésien lors des explosions nucléaires. Des modèles de recherche explicatifs ont été élaborés pour décrire au mieux les processus naturels intervenant dans les transferts de radionucléides entre l'atmosphère, les sols et les eaux marines, les plantes et les animaux tant terrestres que marins. Des codes opérationnels ont été mis au point pour apporter des réponses pratiques, permettant d'estimer *a priori* les impacts radioécologiques et dosimétriques des essais réalisés en situation nominale. Ces codes de calcul reposent aujourd'hui sur d'importantes bases de données relatives aux facteurs de transfert, de concentration, etc. issus de travaux expérimentaux. Ils ont été validés par les résultats de mesure des niveaux de radioactivité observés dans le cadre de la surveillance radiologique des écosystèmes polynésiens.

II.5 - BIBLIOGRAPHIE

BOUCHEZ J. & LECOMTE R. (1995). - Les atolls de Mururoa et de Fangataufa (Polynésie Française). - II. Les expérimentations nucléaires. Effets mécaniques, lumino-thermiques, électromagnétiques. DIRCEN/CEA/Masson Eds, 192 p.

CARISTAN Y., DARD J., de LABROUHE de LABORDERIE J., LAVIE J.M., LEWIN G., MICHAUD L., M. VAISSE. BRUYLANT (1996). - Les essais nucléaires français. Bruxelles.

CAROLL J. and LERCHE J. (2004). - Sedimentary process: quantification using radionuclides, 2004. Radioactivity in the environment Vol 5, Elsevier.

DALHMAN O. & ISRAELSON H. (1977). - Monitoring Underground Nuclear Explosions. - Elsevier Amsterdam.

FAIRHUST C., A Report of the International Geomechanical Commission. Stability and Hydrology Issues Related to Underground Nuclear Testing in French Polynesia: Volume I: General Results, Volume II: Technical Analyses et Volume III, Les Essais Nucléaires Souterrains en Polynésie Française: Stabilité et Hydrogéologie. La Documentation Française.

IAEA (1985). - Sédiment distribution coefficients and concentration factors for biota in the Marine Environment. Technical report series N° 422, Vienne, 1985, 95 p.

IAEA (1994). - Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in the terrestrial and freshwater environment. Technical report series N° 364, Vienne, 1994.

IZRAEL Yu. A. (2004). - Radioactive fallout after nuclear explosions and accidents. Hugh D. Livingstone (editor), Elsevier.

JOHNSON G. W., HIGGINS G. and VIOLET C.E. (1959). - Underground nuclear detonations. J. Geophys. Res., 64(10), 1457–1470.

KUDI A. (2004). - Plutonium in the environment. Radioactivity in the environment Vol 1, Elsevier.

LADD H. S., INGERSON E., TOWNSEND R.C., RUSSEL M. and STEPHENSON H.K. (1953). - Drilling on Enivetok Atoll, Marshall Islands. Bull. Am. Assoc. Petr. Geologists, 37(10), 2257–2280.

LIVENS F.R. and KEITH ROACH (2004). - Interactions of microorganisms with radionuclides, 2004. Radioactivity in the environment Vol 2, Elsevier.

LIVINGSTON H.D. (2004). - Marine radioactivity, 2004. Radioactivity in the environment Vol 6, Elsevier.

MARIOTTI C. and BOUCHEZ J. (1989). - Différences rhéologiques sous pression de confinement entre des craies tendres naturelles et synthétiques. In V. Maury and D. Fourmaintraux (editors), Rock at Great Depth (Proceedings of the ISRM/SPE International Symposium, August 1989, Pau), pp. 93–99, Balkema, Rotterdam.

OTA (1989). - The containment of underground nuclear explosions. Tech. Rep. OTAISC414, U.S. Congress, Office of Technology Assessment, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

PERROCHET P. and TACHER L. (1997). - Mathematical modeling of hydrothermal Processes inMururoa atoll. Tech. Rep. International Geomechanical Commission (University of Minnesota), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire de Géologie.

PETERSON E., LIE K., RIMER N., NILSON R. and HIGGINS G. (1991). - Thermodynamic evolution of nuclear cavities. In Proceedings of the 6th Symposium on Containment of Underground Nuclear Explosions (University of Nevada, Reno, September 1991), vol. 1, pp. 257–274, Livermore, California: Lawrence Livermore National Laboratory.

KLEMENT ed. (1965). - Radioactive fallout from nuclear weapons tests. Proceedings of the second conference Germantown, Maryland, Nov 3-6, 1964. US Atomic Energy Commission, Division of technical information, Nov 1965.

RINEHART J. S. (1960). - On fractures caused by explosions and impacts. Q. Colorado School Mines, 55(4), 1–155.

RODEABN H. C. (1971). - Nuclear Explosion Seismology. Oak Ridge, Tennessee: U.S. Atomic Energy Commission.

RODIONOV V. N., ADUSHKIN V.V., KOSTIUCHENKO V.N., NIKOLAEVSKII V.N., ROMASHOV A.N. and TSVETKOV V.M. (1971). - Mechanical Effects of an Underground Explosion. Moscow: Nedra.

SCOTT E. M. (2004). - Modelling radioactivity in the environment, 2004. Radioactivity in the environment Vol 4, Elsevier.

SHARMA A. (1998). - India sets off three nuclear blasts. St. Paul Pioneer Press, (May 12), Associated Press. Yu A. Izrael, (2004) Radioactive fallout after nuclear explosions and accidents. Radioactivity in the environment Vol 3, Elsevier.

SMITH D. K., NAGLE R.J. and KENNEALLY J.M. (1996). - Transport of gaseous fission products adjacent to an underground nuclear test cavity. Radiochimica Acta, 73, 177–183.

CHAPITRE III

Matériels et méthode de la surveillance radiologique

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

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

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

III.1 - LABORATOIRES DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

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

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

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

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

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

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

III.2 - CHOIX DES COMPOSANTES À SURVEILLER

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

- connaître, à tout moment, les niveaux représentatifs de la radioactivité d'origine artificielle des différentes composantes de l'environnement ;
- estimer la composante dosimétrique associée aux niveaux d'activité des radionucléides d'origine artificielle mesurés. Depuis l'arrêt des essais atmosphériques, cette composante est essentiellement associée à l'exposition interne, par ingestion d'aliments contenant des radionucléides issus des dépôts historiques.

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

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

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

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

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

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

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

III.3 - STRATÉGIE DE PRÉLÈVEMENT D'ÉCHANTILLONS

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

III.3.1 - SITES D'EXPÉRIMENTATIONS

III.3.1.1 - REPÉRAGE GÉOGRAPHIQUE DES STATIONS DE SURVEILLANCE

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

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

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

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

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

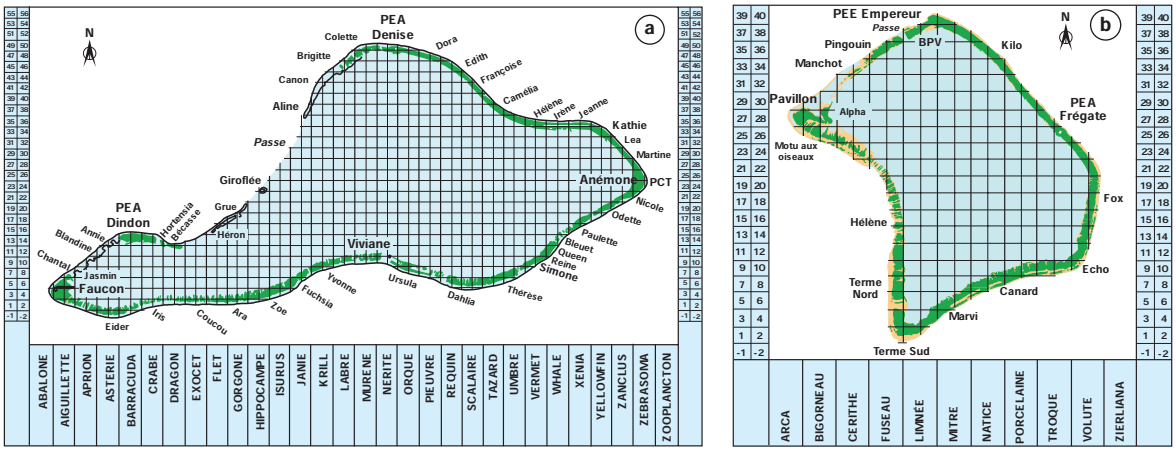


FIG. 47. - Repères géographiques utilisés lors des essais aériens et souterrains, et dans le cadre de la surveillance environnementale des sites de Mururoa (a) et Fangataufa (b).

III.3.1.2 - PROCÉDURES DE SURVEILLANCE

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

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

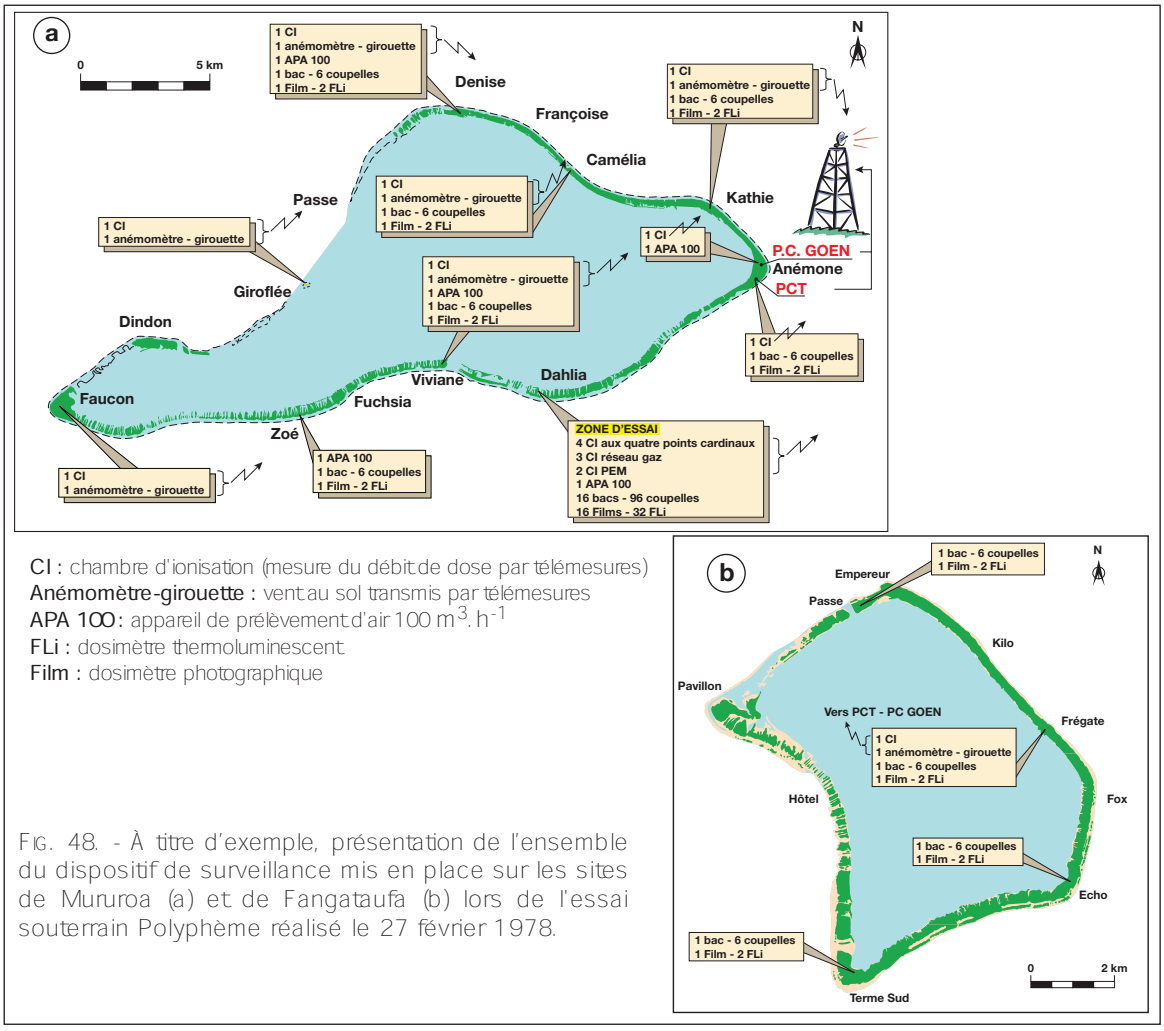
Durant la période des essais souterrains, bien que les rejets attendus de radionucléides dans l'environnement devaient être très faibles, un dispositif permanent de surveillance de la radioactivité a été maintenu pour garantir la protection du personnel qui restait sur l'atoll (cf. Chapitre II). Les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

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

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

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

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



CI : chambre d'ionisation (mesure du débit de dose par télémesures)
Anémomètre-girouette : vent au sol transmis par télémesures
APA 100 : appareil de prélèvement d'air 100 $m^3.h^{-1}$
FLi : dosimètre thermoluminescent
Film : dosimètre photographique

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

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

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

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

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

Au niveau de la plate-forme de forage, comme pour le dispositif terrestre, les capteurs radiologiques et ceux des gaz explosifs ou toxiques (H_2, CO, CO_2, CH_4) étaient implantés sur le plancher de forage, sur le dispositif de retour des boues du forage, sur la tête du puits du post-forage, sur l'aire de dépotage, etc. Un circuit de prélèvements atmosphériques permettait de surveiller l'ensemble des installations de la barge de forage.

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

- des prélèvements annuels à l'intérieur des lagons de Mururoa et de Fangataufa. La fréquence, la localisation et la profondeur des prélèvements ont évolué au cours du temps, vers une optimisation du dispositif de surveillance ;
- des prélèvements réalisés aux abords immédiats des atolls de Mururoa (8 stations) et de Fangataufa (6 stations). Selon les emplacements, les prélèvements sont effectués, le plus près possible du récif, en surface, à 200, 400 et 600 mètres (surface, 150 et 300 mètres pour les passes) ;
- des prélèvements en milieu océanique, effectués en 7 emplacements situés à 12 milles nautiques des deux sites d'expérimentations. Ils sont principalement réalisés en surface, mais également en profondeur (300, 600 et 900 mètres), à partir de 1994.

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

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

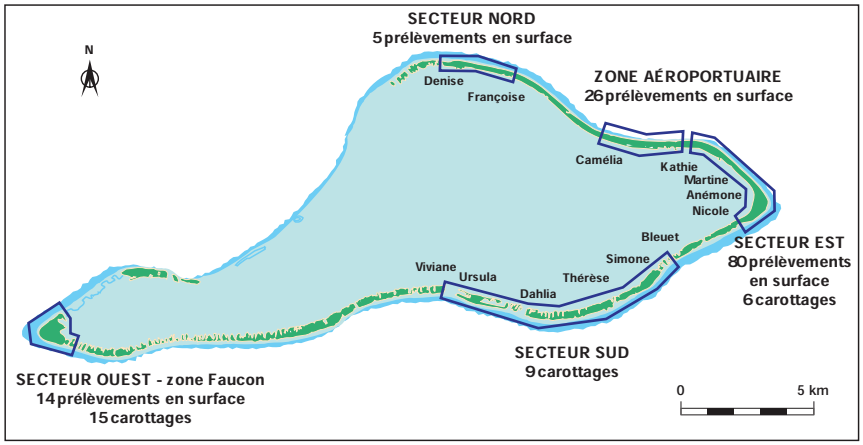


FIG. 49. - Localisation des zones de prélèvement et du nombre d'échantillons de sol prélevés par secteur, en 1992, sur l'atoll de Mururoa.

III.3.2 - POLYNÉSIE FRANÇAISE

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

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

- couvrir géographiquement l'ensemble du territoire de la Polynésie française, presque 2 000 km d'est en ouest et du nord au sud, soit près de 4 000 000 de km^2 ;
- tenir compte de la typologie des deux catégories d'îles ; îles hautes et atolls, et ceci avec le souci de respecter les diversités environnementales et écologiques ;
- respecter la démographie, très hétérogène, de la Polynésie française ;
- tenir compte de la position des deux atolls de Mururoa et Fangataufa et des vents dominants, facteur important quant aux trajets potentiels des retombées des essais.

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

Le réseau de surveillance comprenait :

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

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

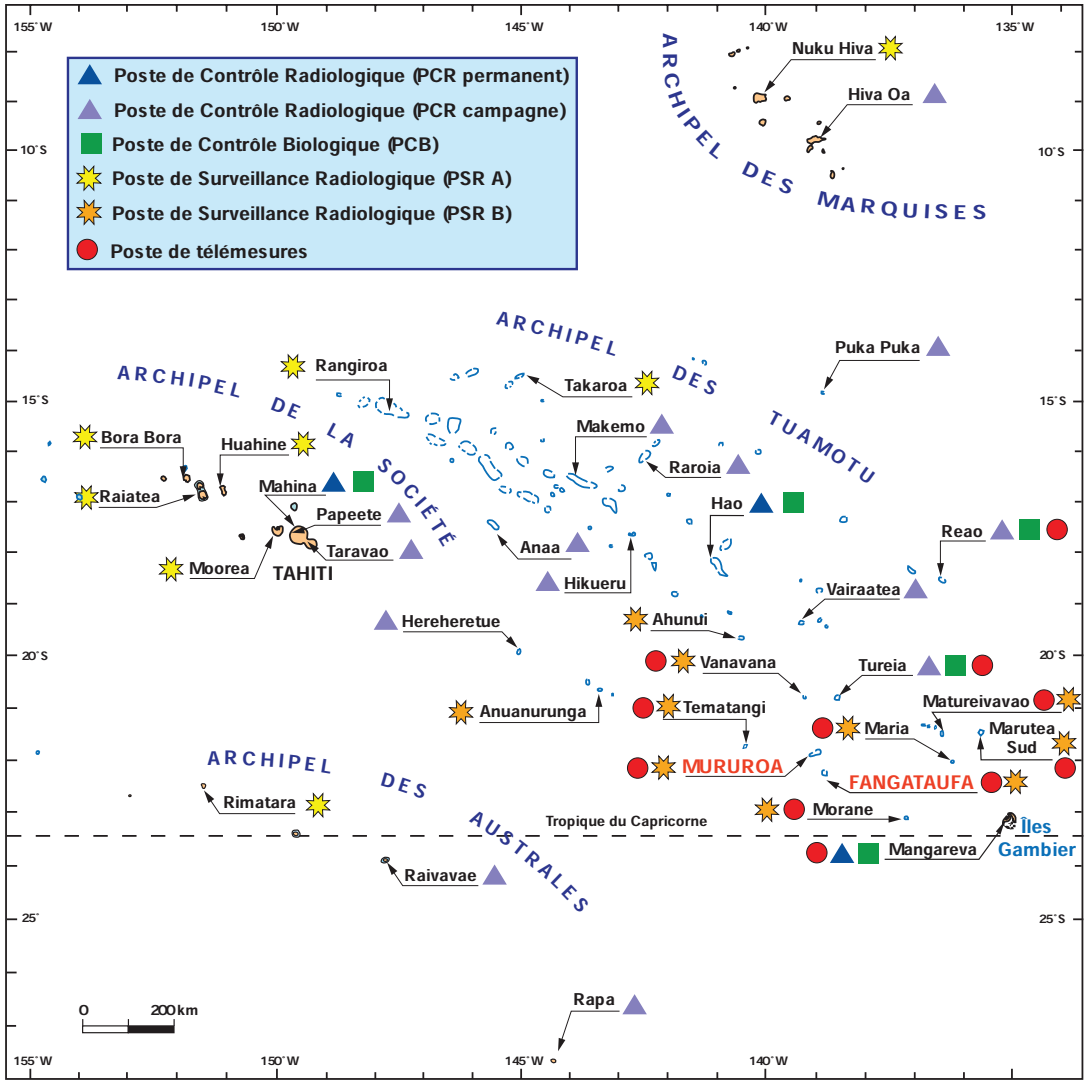


FIG. 50. - Localisation des postes de contrôle et de surveillance radiologique et biologique, en Polynésie française, lors de la période des essais atmosphériques.

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

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

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

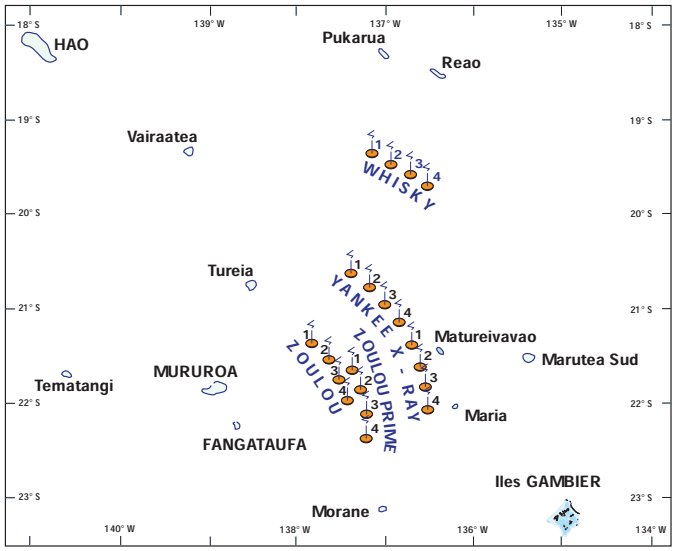


FIG. 51. - Position des différentes lignes de bouées mises en place lors de l'essai mégatonnique Canopus du 24 août 1968.

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

Pendant la période des essais souterrains, le dispositif de surveillance des niveaux de la radioactivité atmosphérique a été allégé au cours du temps, puisque le risque d'une contamination de l'atmosphère était inexistant, en dehors de la zone du lagon où était effectué l'essai. Cependant, à titre de précaution, le dispositif en place lors de la période des essais atmosphériques a été pour l'essentiel reconduit lors des premiers essais souterrains, en 1975 (Fig. 52).

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

- des PCR à terre à Tureia, Reao, Totegegie (îles Gambier), Hao et Tahiti (station permanente de Mahina) ;
- des PCR embarqués sur les navires *E.V. Henry*, *Rivière*, *Protet*, *Paimpolaise*, *Lorientaise* et *BCB Marara* ;
- des PSR à Taravao (Tahiti), Bora Bora, Rangiroa, Makemo, Hiva Oa, Hereheretue, Raivavae, Tubuai ;
- un réseau de balises de télémesures implantées sur les atolls de Tematangi, Matureivavao, Morane, Pukarua, Vahitahi, Vairaatea, piloté par la station centrale de Tureia ;

- un PCB à Tahiti (station permanente de Mahina), Hao, Reao, Tureia et Mangareva (îles Gambier) ;
- un aéronef équipé de moyens de détection de la radioactivité d'un nuage issu d'une éventuelle fuite, pouvant réalisé un largage de bouées radiologiques ;
- le *BCB Marara* pour la détection d'une éventuelle émission sous-marine au moment de l'essai et pour le suivi de routine du milieu correspondant à la zone océanique des 200 milles nautiques prévue par les conventions internationales ;
- le *BDC Trieux* était en alerte pour une éventuelle intervention sur un atoll habité.

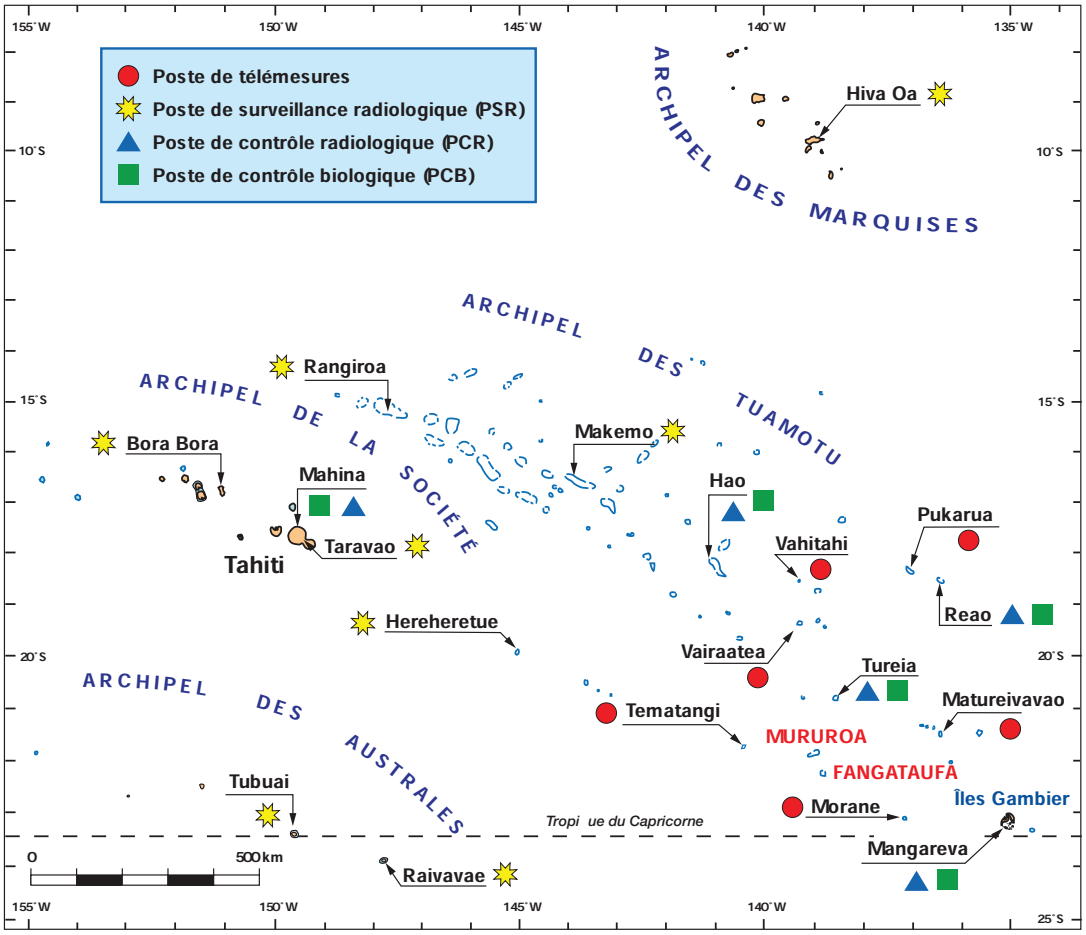


FIG. 52. - Localisation des postes de contrôle et de surveillance radiologique et biologique en Polynésie française lors des essais souterrains effectués en 1975.

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

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

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

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

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

- **Archipel de la Société.** Deux îles ont été sélectionnées : Tahiti et Maupiti. Tahiti, d'une surface émergée de 1 042 km^2 est la plus grande île de l'archipel. Elle accueille 70 % de la population du Territoire avec 170 000 habitants en 2002. Maupiti a une superficie de 12 km^2 sur lesquelles vivent environ 1 000 habitants. Elle se situe à l'extrême ouest de l'archipel de la Société.
- **Archipel des Tuamotu.** Deux îles ont été retenues : Rangiroa et Hao. Rangiroa se trouve à l'extrême nord-ouest de l'archipel. C'est le plus grand et le plus peuplé des atolls des Tuamotu, avec 79 km^2 de terres émergées et environ 2 350 habitants. Au sud-est de l'archipel, il est situé à 450 km, au nord-ouest de Mururoa. Hao est un atoll d'une superficie totale de 720 km^2, dont 30 km^2 de terres émergées. Avec 1 300 habitants, Hao est, après Rangiroa, l'atoll le plus peuplé de l'archipel des Tuamotu.
- **Archipel des Gambier.** Mangareva qui a été retenue pour la surveillance est la plus grande île de l'archipel. C'est une île haute de 15 km^2, comptant un peu plus d'un millier d'habitants. Il s'agit de la seule île retenue pour la surveillance radiologique qui soit située à l'est des atolls de Mururoa et Fangataufa, dont elle est distante de 450 km.
- **Archipel des Marquises.** Hiva Oa fait partie du groupe sud des îles de cet archipel. C'est une île haute de 315 km^2, habitée par environ 2 000 personnes en 2002. Elle est considérée comme la plus fertile. Hiva Oa présente la particularité de se situer au nord du territoire polynésien, à 1 800 km des atolls de Mururoa et Fangataufa. C'est l'île la plus éloignée des atolls d'expérimentations à faire l'objet d'une surveillance radiologique.
- **Archipel des Australes.** L'île retenue est Tubuai. Avec 45 km^2, c'est la plus grande des cinq îles habitées. 2 200 habitants y ont été recensés en 2002. Elle est localisée à environ 1 100 km des atolls de Mururoa et Fangataufa.

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

III.3.3 - RÉSEAU MONDIAL FRANÇAIS DE SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE

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

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

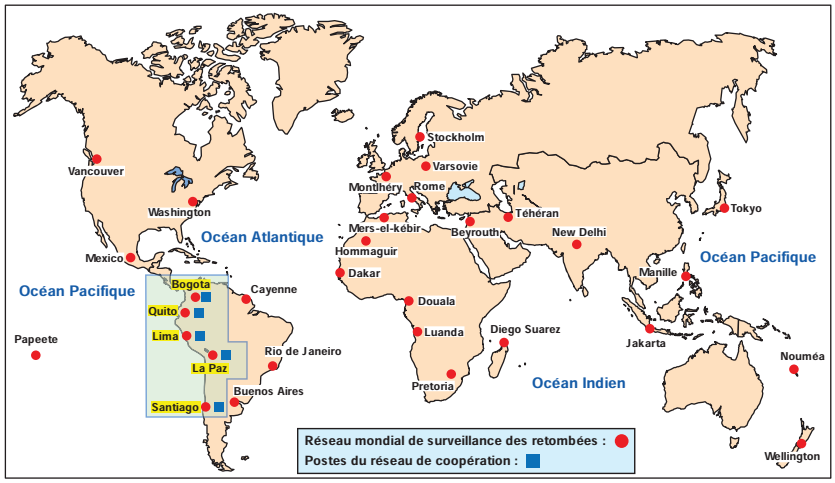


FIG. 53. - Localisation des stations de prélèvement d'échantillons d'aérosols atmosphériques et de produits alimentaires appartenant au réseau mondial français de surveillance radiologique.

III.4 - PRÉLÈVEMENTS D'ÉCHANTILLONS ENVIRONNEMENTAUX

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

III.4.1 - PRÉLÈVEMENTS ATMOSPHÉRIQUES

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

III.4.1.1 - AÉROSOLS

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

Pendant la période des essais atmosphériques, les appareils de prélèvements d'air étaient multiples. Ils couvraient les gammes 1, 10, 100 et exceptionnellement 1 000 $m^3.h^{-1}$, l'appareil le plus utilisé à l'extérieur était l'APA 100, Appareil de Prélèvement Atmosphérique d'un débit de 100 $m^3.h^{-1}$. Le spectre granulométrique des retombées proches étant constitué d'une fraction importante de particules lourdes, ces appareils étaient dotés d'une tête de prélèvement omnidirectionnelle permettant d'améliorer la collecte de cette fraction. Les résultats fournis par ces appareils, complétés par ceux des études granulométriques mettant en œuvre des impacteurs, des bacs collecteurs de retombées et des autoradiographies, permirent d'affiner la connaissance des spectres granulométriques des retombées afin d'améliorer les modèles de prévision de l'impact radiologique des essais atmosphériques.


Changement du filtre sur un Casa.

Les modifications de l'APA 100 dans les années 1980 conduisirent à la qualification du CASA 110, Collecteur d'Aérosols de Surveillance Atmosphérique d'un débit de 110 $m^3.h^{-1}$. La tête d'aspiration, placée à 1,20 mètre du sol, est protégée des intempéries par un chapeau conique. Le média filtrant utilisé est caractérisé par un rendement de piégeage de 99 % pour les particules inhalables. En revanche, les protocoles de prélèvement ont peu évolué au cours du temps : le prélèvement est d'environ 2 000 m^3 filtrés sur 24 heures.

Dans le cadre de la surveillance de l'atmosphère réalisée à Papeete à Tahiti par le Lése (IRSN), les aérosols sont prélevés à l'aide d'un appareil à haut débit de 400 $m^3.h^{-1}$. Le média filtrant est en polypropylène, de 27 par 48 cm de côté, ayant une capacité de rétention proche de 100% pour les particules de 1 à 10 µm. Le prélèvement est effectué en continu, les filtres étaient changés tous les cinq jours et groupés par deux pour la mesure de l'indice bêta global, du ^{90}Sr et des radionucléides émetteurs gamma.

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

III.4.1.2 - EAUX DE PLUIE

La collecte des eaux de pluie est réalisée à l'aide d'un pluviomètre en inox, de forme conique et de 1 m^2 de surface de section efficace. Le prélèvement est généralement mensuel. Cependant, durant la période des essais atmosphériques, dans le cas de retombées significatives, la fréquence de prélèvement a été adaptée pour permettre de quantifier l'évolution de l'activité des dépôts humides au cours du temps. Les volumes d'eau de pluie collectés mensuellement sont variables puisqu'ils dépendent de l'intensité des pluies suivant les saisons.


Pluviomètres à Mururoa.

III.4.2 - PRÉLÈVEMENTS EN DOMAINE TERRESTRE

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

III.4.2.1 - EAU DE SOURCE/RUISSEAU

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

III.4.2.2 - EAU DE BOISSON

L'eau potable distribuée sur les bateaux bases stationnés dans le lagon des atolls d'expérimentations faisait l'objet d'un contrôle radiologique afin de garantir un niveau respectant la concentration maximale admissible dans les eaux de boisson. À bord de certains bateaux base, l'eau potable était obtenue par désalinisation de l'eau de mer à l'aide de bouilleurs. Le facteur de désalinisation, donc de l'activité, était de l'ordre d'un facteur 1 000. L'eau en sortie des bouilleurs était stockée dans une cuve tampon isolée du circuit de distribution des bateaux. Elle faisait l'objet de prélèvements d'échantillons qui étaient mesurés par le laboratoire SMSR du BSL *Rance*. Après avoir vérifié que l'activité volumique était inférieure à la concentration maximale admissible pour l'eau de boisson, la cuve était connectée au circuit de distribution. L'approvisionnement en eau potable était également assuré par les ravitailleurs d'eau douce, *Hanap* et *Giboulée*, venant de Hao.

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

III.4.2.3 - SOLS

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

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

Différents types de sols ont été identifiés :

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

Les prélèvements de sols de surface sont exécutés, soit par raclage de la couche superficielle sur 1 cm d'épaisseur d'une surface de 100 cm^2 (cas de Fangataufa), soit à l'aide d'un gabarit de 20 cm sur 25 cm, permettant le recueil des deux premiers centimètres de sol.

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

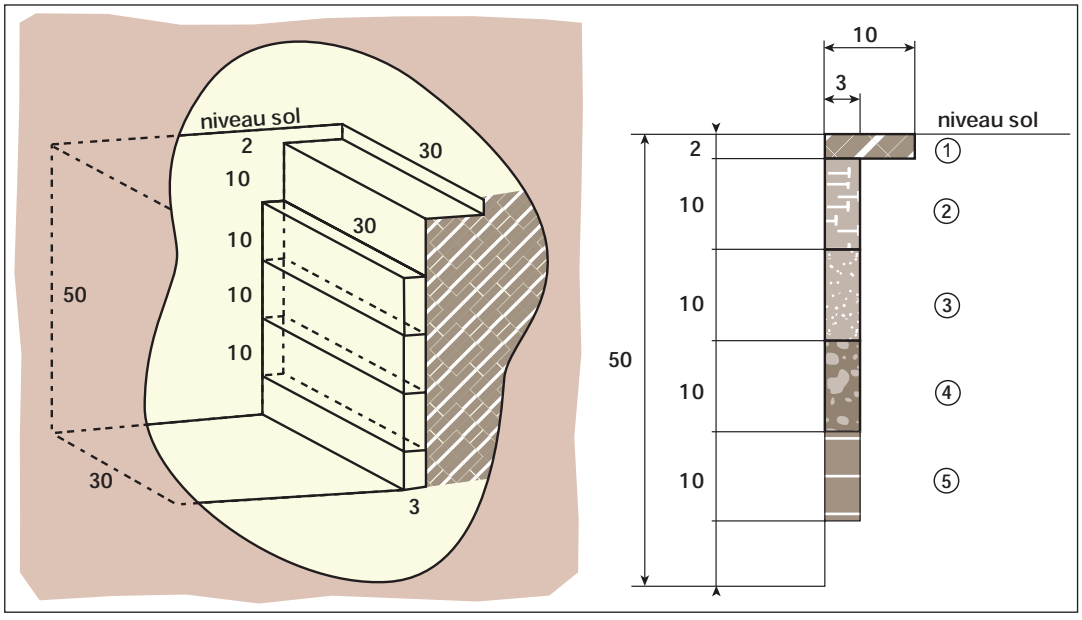


FIG. 54. – Schéma de principe des prélèvements d'échantillons de sol en fonction de la profondeur (*les cotes sont données en cm*).

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

$$A_s = A_d . h . \rho$$

avec :

A_s = activité surfacique, en $Bq.m^{-2}$;
A_d = activité moyenne pondérée en profondeur, en $Bq.kg^{-1}$;
h = épaisseur de l'ensemble des prélèvements prise en compte, en m;
ρ = masse volumique du sol prélevé (1 600 $kg.m^{-3}$).

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

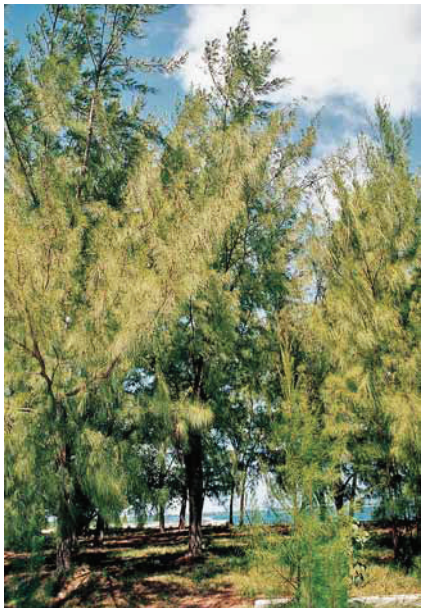
III.4.2.4 - VÉGÉTAUX

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

• Le ***Scaevola sericea,*** est une plante au port arbustif prostré, très largement répandue sur les atolls. Elle forme des fourrés denses sur les sables littoraux, dépassant rarement un mètre de hauteur.



Massif de *Scaevola sericea*.



Aito (*Casuarina equisetifolia*).

• L'**arbre de fer** (*Casuarina equisetifolia*), appelé *aito* en polynésien et *filao* dans l'Océan Indien, est un arbre rameux, ressemblant à un conifère. Les feuilles, à forme d'aiguilles, piègent efficacement les particules atmosphériques. Cet arbre, importé de Tahiti pour servir de plante ornementale et de coupe-vent, a proliféré sur les atolls, pour devenir très abondant à Mururoa et Fangataufa. Des échantillons d'aiguilles font l'objet de mesures systématiques depuis 1982.

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

• Le **papayer** (*Carica papaya*) a été introduit tardivement dans le secteur Est de l'atoll de Mururoa, lors de l'installation de la zone d'habitation. Ses fruits ont donc fait l'objet d'une surveillance régulière, de 1979 à 1995.



Cocotier (*Cocos nucifera*).



Papayer (*Carica papaya*).

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

III.4.2.5 - PRODUCTIONS AGRICOLES POLYNÉSIENNES

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

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

Échantillons de la ration alimentaire

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

Ils appartiennent à 5 grandes catégories :

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



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

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

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

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

Noix de coco

L'eau de coco est largement consommée dans l'ensemble de la Polynésie. La ration journalière des populations vivant sur les atolls est estimée à un litre par personne. Elle renferme

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

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

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



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



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

Lait de vache

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

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

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

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

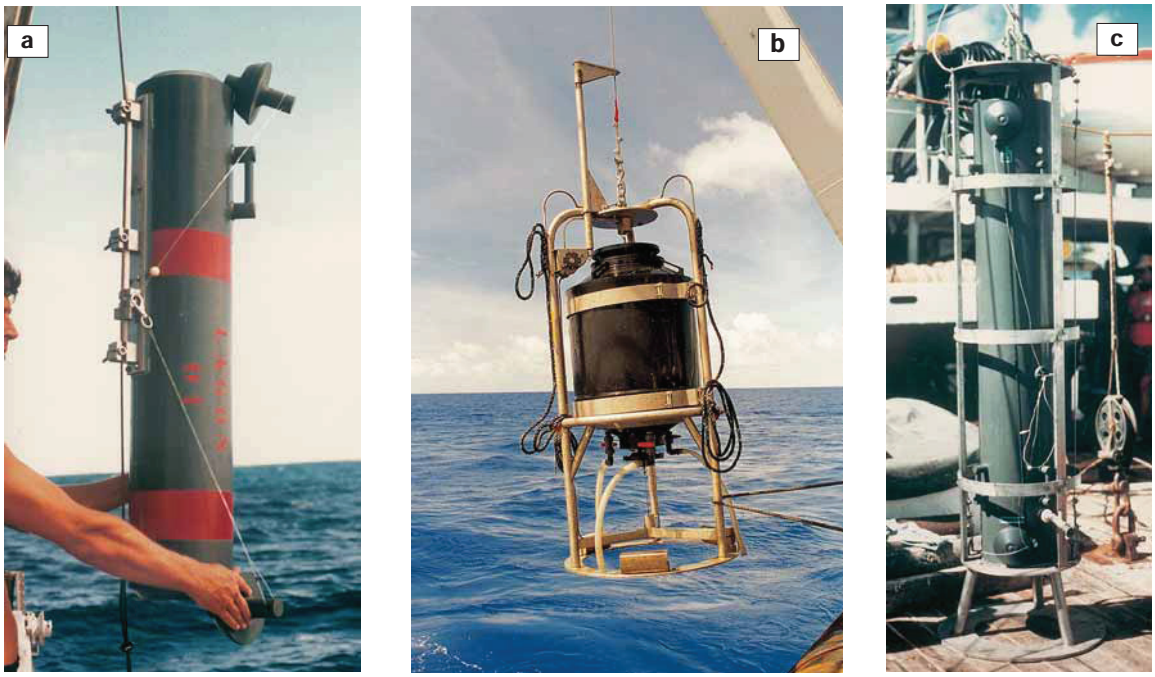
III.4.3 - PRÉLÈVEMENTS EN DOMAINE MARIN

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

III.4.3.1 - EAU DE MER

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

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



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

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

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

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

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

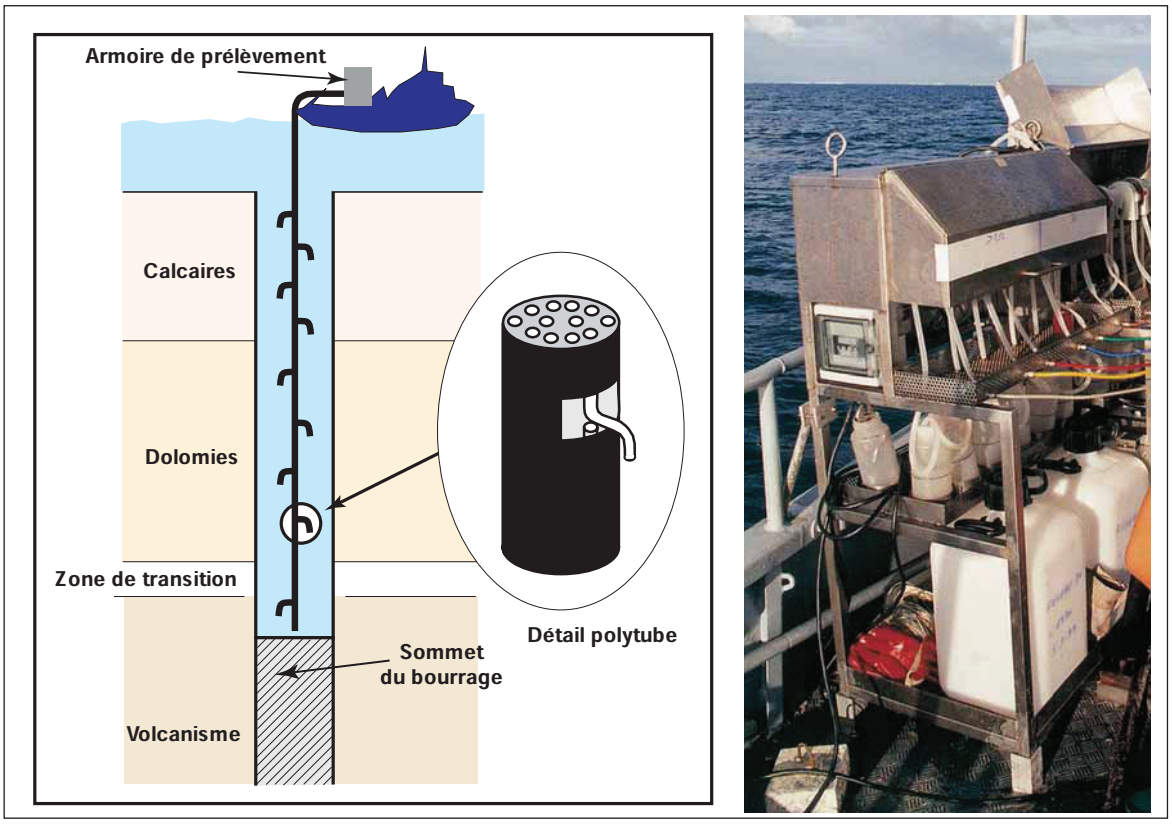


FIG. 55. - Schéma du dispositif dit «polytubes» et son armoire.

III.4.3.2 - SÉDIMENTS

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

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

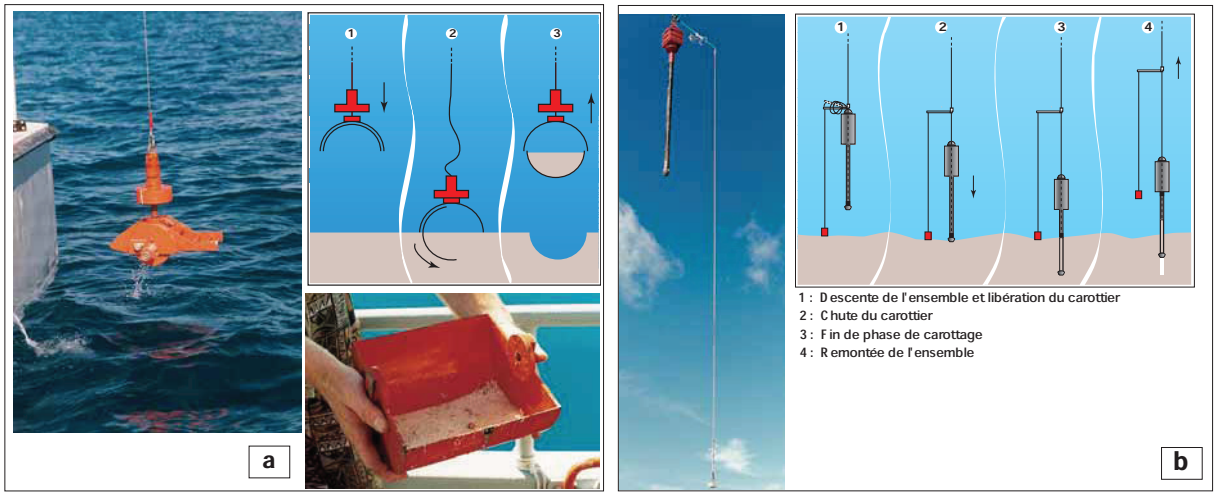


FIG. 56. - (a) : benne de prélèvement superficiel de sédiment, type *Shipeck* avec son principe de fonctionnement et son godet basculant rempli de sédiments.

(b) : carottier *Kullenberg* pour prélèvement de sédiments en profondeur avec son principe de fonctionnement.

III.4.3.3 - PLANCTON

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

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

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

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

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

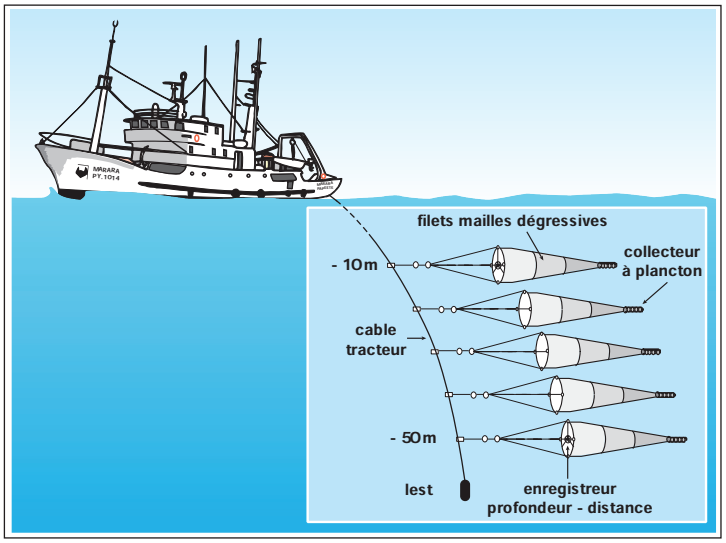


FIG. 57. - Gréement des filets à plancton lors des collectes en domaine océanique par le bâtiment de contrôle biologique *Marara*.

III.4.3.4 - ALGUES BENTHIQUES

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

Entre 1970 et 1981, à Mururoa, les échantillons étaient uniquement constitués d'algues se développant sur leur substrat naturel. À partir de 1982, des substrats artificiels (collecteurs concentrateurs d'algues) ont été mis en place dans le lagon. Il s'agissait de panneaux en toile plastique de 5 m^2 de surface, immergés verticalement à différentes profondeurs (Fig. 58a). Le temps d'immersion d'environ 60 jours était suffisant pour permettre la croissance d'une quantité satisfaisante d'algues, sans pour autant permettre l'installation de trop nombreux animaux. Après relevage des panneaux, les échantillons d'algues étaient prélevés par raclage des deux faces du support.

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

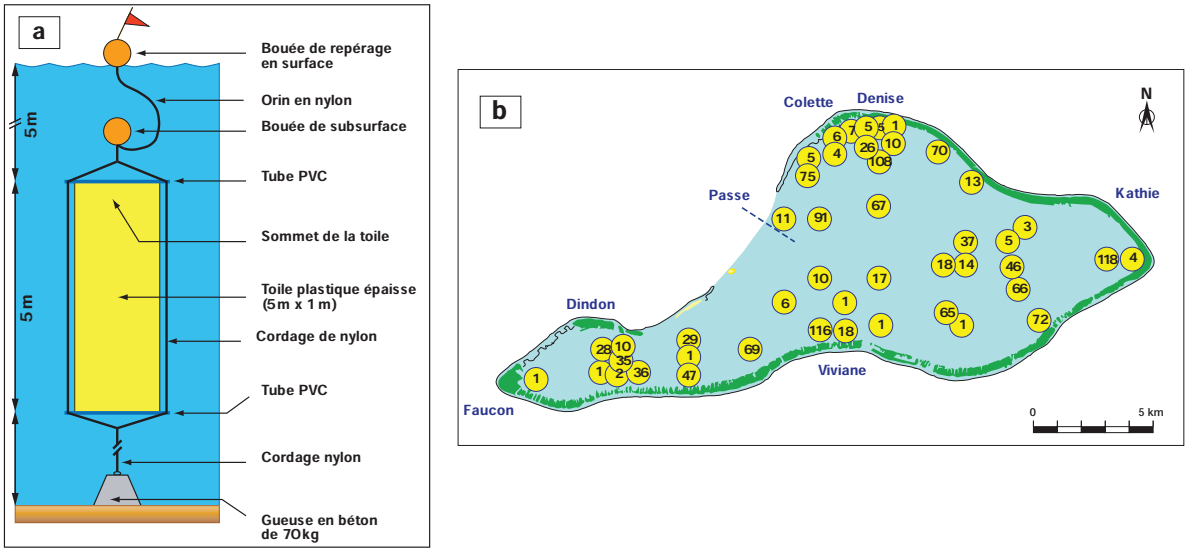
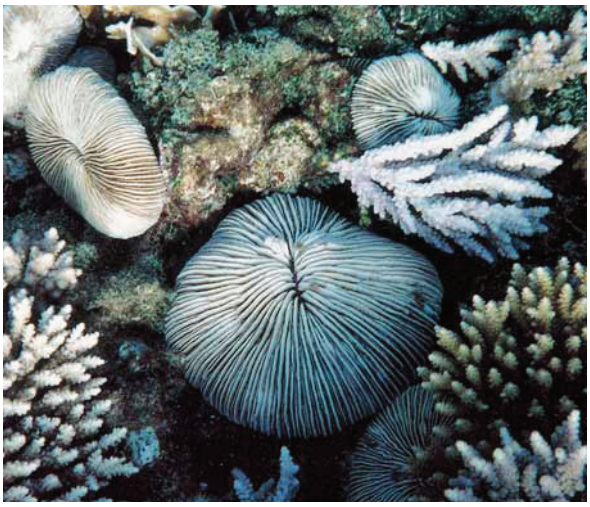


FIG. 58. – Schéma général du montage d'un collecteur concentrateur d'algues (a) et localisation des lieux de prélèvements et nombres d'échantillons d'algues récoltés par station, entre 1970 et 1997, dans le lagon de Mururoa (b).

III.4.3.5 - CORAUX

Plusieurs espèces de madréporaires ont fait l'objet d'analyses radiologiques dans les lagons de Mururoa et de Fangataufa : *Lobophyllia costata*, *Pocillopora verrucosa*, *Acropora pulchra*, *Porites solida*, *Fungia paumotensis* et *Fungia fungites*.



Fungia fungites

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

La collecte des échantillons était effectuée par des plongeurs, en apnée ou en scaphandre autonome, selon la profondeur. En moyenne, trois individus de 10 cm de diamètre sont nécessaires pour constituer un échantillon de 700 grammes. Cette espèce a fait l'objet de prélèvements réguliers, entre 1972 et 1997, dans les lagons de Mururoa et de Fangataufa. Les mesures étaient effectuées sur l'animal entier : squelette calcaire et partie vivante réunis.

III.4.3.6 - HOLOTHURIES

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

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



Holothurie noire (*Holothuria atra*) dans son habitat.

III.4.3.7 - MOLLUSQUES

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

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

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

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

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



Bénitier (*Tridacna maxima*).



Nacres (*Pinctada margaritifera*).

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

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

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



Troca (*Trochus niloticus*).



Turbo soyeux (*Turbo setosus*).

À chaque prélèvement, une centaine de turbos est ramassée à la main, de jour, quand la marée est basse. La masse viscérale (hépatopancréas, tube digestif, branchies, gonades etc.) et

la chair (muscle du pied) sont extraites de la coquille. Les deux fractions ainsi obtenues, viscères (650 g en moyenne) et chair (1 500 g en moyenne) sont analysées séparément. Entre 1968 et 1993, au titre de la surveillance radiologique, des stations ont été choisies dans des zones représentatives du récif externe des atolls de Mururoa (15) et de Fangataufa (14) où plus de huit cents prélèvements de turbos ont été effectués (Fig. 59).

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

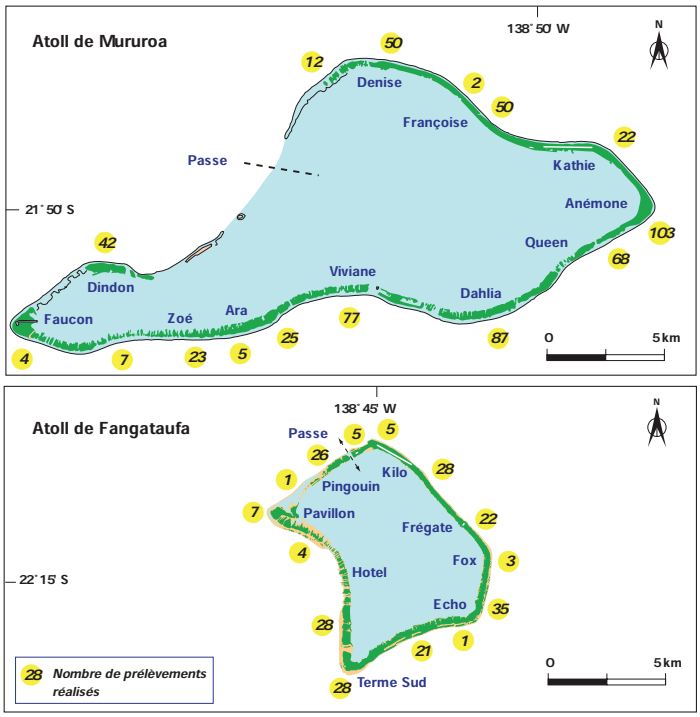


FIG. 59. – Localisation des stations de prélèvements et nombre d'échantillons de turbos prélevés sur le pourtour des récifs externes des atolls d'expérimentations de Mururoa et Fangataufa.

III.4.3.8 - CRUSTACÉS

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



Langouste (*Panulirus penicillatus*).

III.4.3.9 - POISSONS

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

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


Chirurgien (*Ctenochaetus striatus*).


Perroquet (*Scarus gibbus*).

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


Banc de surmulets (*Mulloidichthys flavolineatus*).


Mérou céleste (*Cephalopholis argus*).

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

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

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

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

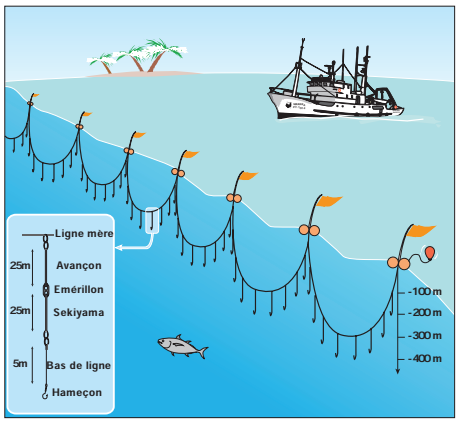


FIG. 60. – Schéma de longue ligne utilisée à bord du *BCB Marara*, avec le détail d'un avançon.



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

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

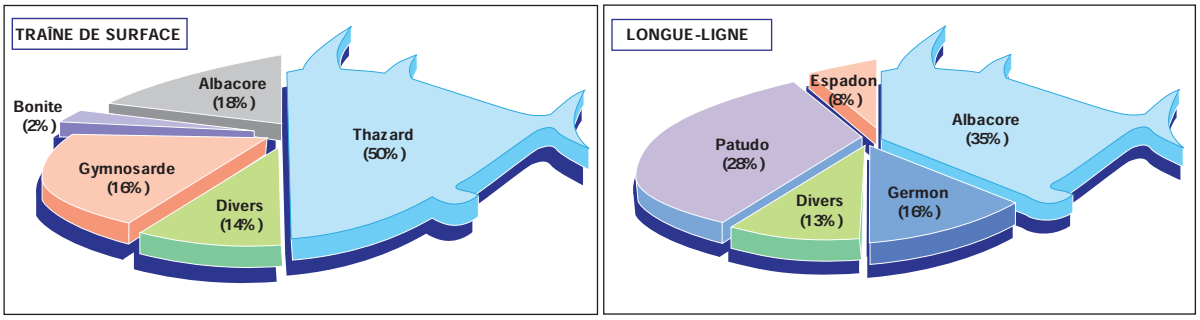


FIG. 61. – Composition relative (%) des captures de poissons pélagiques océaniques, selon les deux techniques de pêche utilisées par le *BCB Marara*, entre 1967 et 1993.

III.5 - MESURES DE LA RADIOACTIVITÉ

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

III.5.1 - AÉROSOLS ATMOSPHÉRIQUES

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

- Chaque filtre fait l'objet d'une mesure des indices alpha global et bêta global immédiatement après son retrait du filtre puis, successivement, trois jours et cinq jours après la fin du prélèvement. Ce délai d'attente permet de s'affranchir de l'activité des radionucléides naturels de période courte et, donc de pouvoir déceler toute activité d'origine artificielle significativement supérieure au bruit de fond des radionucléides émetteurs naturels à vie longue.
- Pendant la période des essais souterrains, la recherche systématique des radionucléides d'origine artificielle (^{137}Cs, ^{238}Pu, $^{239+240}Pu$) à des niveaux d'activité très faibles a conduit à regrouper les filtres utilisés pendant un mois, voire un trimestre. Les mesures par spectrométrie gamma étaient réalisées dans un environnement à très bas bruit de fond, dans les installations du SMSR, au laboratoire souterrain de Modane. Les isotopes du plutonium étaient mesurés par spectrométrie alpha, après traitement radiochimique de l'ensemble des filtres, utilisés durant un mois ou un semestre.

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

Dès les années 80, l'activité volumique des radionucléides d'origine artificielle initialement présents dans l'atmosphère, aux niveaux local et mondial, avait fortement décru. Néanmoins, les préoccupations environnementales ont amené à modifier les techniques de mesure pour s'assurer

du confinement des radionucléides dans le massif géologique. De nouveaux protocoles de prélèvement (grands volumes) et de mesure ont été définis afin d'améliorer très sensiblement les limites de détection et de réduire les incertitudes de mesure (Tableau 11).

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

Nature de l'échantillon analysé	Élément recherché (Prise d'essai)	Type et durée de la préparation	Type et durée du comptage	Limite de détection LD	Type de l'appareillage de mesure
Sols	Émetteurs γ (500 ml)	Étuvage, broyage, (2 h à plusieurs jours)	Spectrométrie γ 4 000 min	^{40}K = 1 Bq.kg^{-1} ^{137}Cs = 0,1 Bq.kg^{-1}	Semi-conducteur Germanium
Sable **Sédiments**	Pu - Am Émetteurs X (10 g)	Mise en solution Séparation sur résine (15 jours)	Spectrométrie α, X 4 000 min	0,02 Bq.kg^{-1}	Semi-conducteur Silicium
Faune	^{90}Sr (10 g)	Mise en solution et extraction (4 jours)	Comptage β Décroissance ^{90}Y 100 min	2 Bq.kg^{-1}	Compteur proportionnel bas bruit de fond
Flore	α global (250 mg)	Étuvage, broyage, et dépôt (40 min)	Comptage α 100 min	140 Bq.kg^{-1}	Scintillation SZn
Tous Solides	β totaux (250 mg)	Étuvage, broyage, et dépôt (40 min)	Comptage β 100 min	350 Bq.kg^{-1}	Compteur proportionnel
Eau de mer	^{137}Cs (300 litres)	Concentration, passage sur résine (2 jours)	Spectrométrie γ	10^{-2} Bq.m^{-3}	Semi-conducteur Germanium
	Pu - Am (300 litres)	Précipitation $Fe(OH)_3$ purification, électrodéposition	Spectrométrie α 4 000 min	2.10^{-4} Bq.m^{-3}	Chambre à grille ou détecteur silicium
	^{90}Sr (200 litres)	Extraction (1 jour)	Comptage β Décroissance ^{90}Y 100 min	10^{-1} Bq.m^{-3}	Compteur proportionnel bas bruit de fond
Eau douce	Eau tritiée (250 ml)	Distillation et enrichissement électrolytique (4 jours)	Comptage β 300 min	120 Bq.m^{-3}	Scintillation liquide
	Eau tritiée (10 ml)	Distillation (1 heure)	Comptage β 100 min	10^3 Bq.m^{-3}	Scintillation liquide
	α, β global eau de mer (20 ml) Eau douce (200 ml)	Évaporation sur coupelle (1 heure)	Comptage α, β 100 min	Eau de mer α = 3 Bq.m^{-3} β = 3 Bq.m^{-3} Eau douce α = 0,15 Bq.m^{-3} β = 0,40 Bq.m^{-3}	• Compteur α à scintillation (SZn) • Compteur proportionnel
Aérosols atmosphériques	Pu (80 000 m^3 par mois)	Mise en solution, traçage, séparation électrodéposition	Spectrométrie α 4 000 min	10^{-8} Bq.m^{-3}	Chambre à grille
	Cs ($4,4.10^5$ m^3 par semestre)	Mise en solution, traçage, séparation électrodéposition	Spectrométrie γ 10 000 min	2.10^{-8} Bq.m^{-3}	Spectrométrie γ (GeHP)
	α, β global (2 400 m^3 journalier)	Mesure directe sur filtres	Comptage α, β 100 min	α = 1.10^{-5} Bq.m^{-3} β = 4.10^{-5} Bq.m^{-3}	• Compteur α à scintillation (SZn) • Compteur proportionnel

III.5.2 - EAUX DE MER

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

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

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

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

III.5.3 - ÉCHANTILLONS BIOLOGIQUES

III.5.3.1 - CONDITIONNEMENT DES ÉCHANTILLONS

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

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

Niveau trophique	Nom commun	Nom scientifique	Fraction prélevée
Producteurs	Algues		Entière
Herbivores	Plancton		Entier
	Mollusques gastropodes		
	Trocas	*Trochus niloticus*	Chair Viscères
	Turbos	*Turbo setosus*	Chair Viscères
	Mollusques bivalves		
	Bénitiers	*Tridacna ma ima*	Parties commestibles
	Chames	*Chama iostoma*	Hépatopancréas
	Arches	*Arca ventricosa*	Parties molles
	Petites huîtres	*inctada maculata*	Parties molles
	Grandes huîtres	*inctada margaritifera*	Parties molles
	Poissons		
	Chirurgiens	*Ctenochaetus striatus*	Éviscéré
	Perroquets	*Scarus gibbus*	Éviscéré
Carnivores	**Coraux**		
Carnivores de la petite faune pélagique	*Acropora*	*Acropora pulchra*	Entier
	ocillopora	*ocillopora verrucosa*	Entier
	Fungia	*Fungia fungites*	Entier
	Loboph llia	*Loboph llia costata*	Entier
Carnivores de la petite faune benthique	**Poissons** Surmulets	*ulloidichth s flavolineatus*	Éviscéré
Carnivores de la grosse faune	**Mollusques octopodes**		
	Pieuvres	*ctopus sp.*	
	Poissons mérous	*Cephalopholis argus et pinephelus merra*	Entier Éviscéré
Détritivores	**Echinodermes**		
	Holothuries noires	*olothuria atra*	Tégument Contenu digestif

Profondeur de pêche	Nom courant	Nom scientifique	Nature de la fraction analysée
Surface	Bonite ou listao	*atsu onus pelamis*	Chair
	Thon à dents de chien	*G mnosarda unicolor*	Chair
	Thazard	*Acanthoc bium solandri*	Chair
	Jeune thon albacore	*Thunnus albacares*	Chair
	Jeune thon patudo	*Thunnus obesus*	Chair
100 à 200 m	Thon albacore	*Thunnus albacares*	Chair
300 à 400 m	Thon germon	*Thunnus alalunga*	Chair
300 à 400 m	Thon patudo	*Thunnus obesus*	Chair

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

* : Anémone symbiotique du pagure.

III.5.3.2 - PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

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

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

III.5.3.3 - MESURES DES ÉCHANTILLONS

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

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

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

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

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

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

III.6 - EXERCICES D'INTERCOMPARAISON

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

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

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

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

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

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

III.6.1 - EXERCICE D'INTERCOMPARAISON AIEA-PLANCTON

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

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

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

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

III.6.2 - EXERCICE D'INTERCOMPARAISON AIEA-ALIMENTS

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

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

- *Marine environment laboratory* (AIEA), Monaco ;
- *Lawrence Livermore national laboratory*, Université de Californie, Livermore, États-Unis ;
- *Radiation physics department*, Université de Lund, Suède ;
- *Federal fisheries center*, Hambourg, Allemagne ;
- *Australian radiation laboratory*, Victoria, Australie ;
- *National radiation laboratory*, Christchurch, Nouvelle-Zélande ;
- *Fisheries laboratory*, Lowestoft, Grande-Bretagne ;
- Service mixte de surveillance radiologique et biologique de l'Homme et de l'environnement, du CEA et de la Dircen.

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

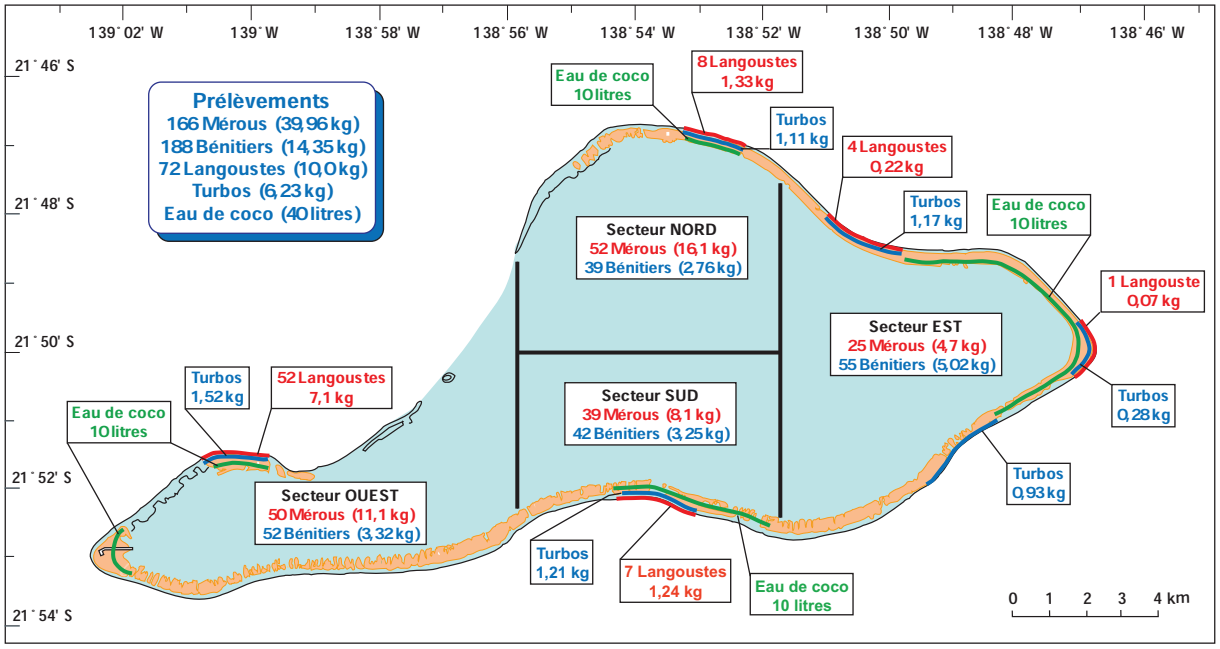


FIG. 62. – Lieux de prélèvements, natures et masses des échantillons prélevés à Mururoa, dans le cadre de l'intercomparaison avec l'AIEA, en 1994.

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

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

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

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

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

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

III.7 - CONCLUSION

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

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

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

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

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

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

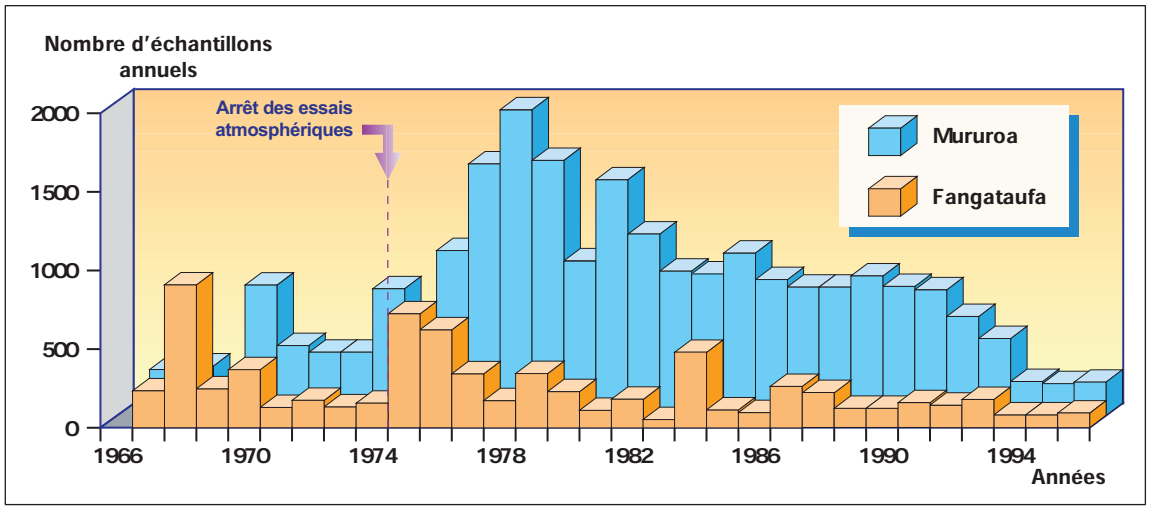


FIG. 63. – Évolution au cours du temps du nombre d'échantillons biologiques réalisés annuellement sur les sites d'expérimentations de Mururoa et Fangataufa.

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

III.8 - BIBLIOGRAPHIE

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

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

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

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

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

BOURLAT Y., MILLIES-LACROIX J-C. et LATOUR A., (1994) - Measurements of very low-level radioactivity with HP Ge detectors installed in the Modane Underground Laboratory; Proceedings of the South Pacific Environmental Radioactivity Association, 3rd Spera Workshop, Canberra (Australia), pages 80-85.

BOURLAT Y., MILLIES-LACROIX J-C. and MARTIN G., (1995) - Results of measurements made by SMSRB on samples collected in Mururoa by international scientific delegations. ICRM Conference on Low Level Measurement Techniques, Seville (Spain), October 2-6, 1995 in Applied Radiation and Isotopes.

CHIAPPINI R., TAILLADE J.M., (1995) - Les mesures de traces de radionucléides à vie longue dans l'environnement par ICP-MS. Actes du Congrès "Métrologie 95".

CHIAPPINI R., TAILLADE J.M. et BREBION S. (1995) - Development of a high-sensitivity Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer for actinide measurement in the femtogram range. Rapport SMSRB.

DSCEN (2003). - «Guide de surveillance radiologique des atolls de Mururoa et de Fangataufa». Rapport DSCEN

DSCEN (2003). - «Guide de surveillance géomécanique des atolls de Mururoa et de Fangataufa». Rapport DSCEN.

GARCIA-LEON M., MADURGA G., Editors, (1987) - Low-level Measurements and their applications to environmental radioactivity Proceedings of the first International Summer School, La Rabida, Huelva, Spain - World Scientific.

MARTIN G., BOURLAT Y., GERARD R., TREGUIER J.Y. et BABLET J.P., (1991) - Results interpretation of radioactivity intercomparison in seawater and plankton collected outside Mururoa Atoll. Report n°11/SMSR/91.

MARTIN J.M., THOMAS A.J., CHARRIER B., COUSTEAU J.Y. & SARANO F. (1990). - Assessment of artificial radionucleides issued from french nuclear bomb testing at Mururoa (french Polynesia). - Environmental Technology Letters, 11, n° 3, pp. 197-204.

MILLIES-LACROIX J-C., BOURLAT Y. et ABT D., (1994) - Mesures de très faibles radioactivités dans des échantillons de l'environnement au moyen des détecteurs Ge HP installés dans le laboratoire souterrain de Modane - Journée de spectrométrie gamma et X93, 12-14 octobre 1993. Note CEA – N – 2756, p. 323-328.

MILLIES-LACROIX J-C., BOURLAT Y. et LATOUR A., (1994). - Mesures de très faibles radioactivités par spectrométrie gamma dans le laboratoire souterrain de Modane - Journée de spectrométrie gamma et X93, 12-14 octobre 1993. Note CEA – N – 2756 p. 341-346.

NAKANISHI T. and al., (1984) - Determination of ^{239,240}Pu in Seawater. N.I.M. 223, 239-242.

ROBE M.C., RANNOU A. et LE BRONEC J. (1992). - Le radon dans l'environnement : Aspects physiques et sanitaires. Une revue des données en France. IPSN/DPEI/SERAC, 91191 GIF-SUR-YVETTE - Rapport DPEI/92-04.

SAKANOUE M. (1987) - Low energy photon spectrometry for Pb-210 in the environment. Low-level measurements and their applications to environmental radioactivity, p. 374-381; Proceedings of the first International Summer School, La Rabida, Huelva, Spain. Garcia-Leon M., Madurga G., Editors. World Scientific.

VINTERSVED I. (1994) - Intercomparison of large air samplers. Nordic Radioecology. The transfer of radionucides through Nordic ecosystems to man. Chapter 1.2. Edited by Dahlgaard H. Elsevier Science.

CHAPITRE IV

Évolution de la radioactivité des sites d'expérimentations

À partir de la fin des années cinquante, la radioactivité d'origine artificielle détectée sur l'ensemble des composantes environnementales de la planète : atmosphère, eau, sol et organismes vivants, résultait des retombées de radionucléides associées aux essais atmosphériques menés par l'ensemble des puissances nucléaires. Dans chaque hémisphère, les niveaux des dépôts au sol des radionucléides fluctuaient en fonction de la latitude et de l'altitude des lieux de mesure. Ceux de l'hémisphère Nord, où ont eu lieu l'essentiel des essais nucléaires atmosphériques, étaient sensiblement plus élevés que ceux de l'hémisphère Sud (Fig. 64). Les retombées dues aux essais réalisés à Mururoa et Fangataufa, qu'elles soient locales, régionales ou mondiales, se sont donc superposées aux dépôts résultant des essais nucléaires des autres puissances.

Ce chapitre présente l'essentiel des résultats de mesure de l'activité des radionucléides les plus caractéristiques des essais issus de la surveillance radiologique des différentes composantes naturelles de l'environnement des sites d'expérimentations de 1966 à nos jours.

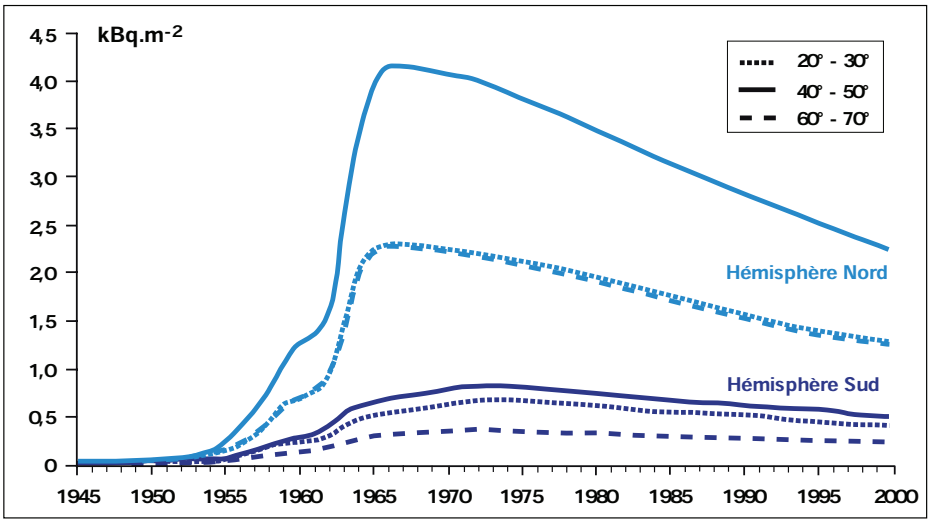


Fig. 64. - Évolution des dépôts surfaciques (kBq.m^{-2}) dus aux retombées radioactives au cours du temps aux latitudes 20° - 30°, 40° - 50° et 60° - 70° des hémisphères Nord et Sud (*modifié d'après Unscear, 2000*).

IV.1 - ATMOSPHÈRE

La surveillance de l'atmosphère des sites était assurée par la collecte en continu des aérosols sur des filtres faisant l'objet d'une mesure des indices alpha et bêta globaux et des principaux radionucléides émetteurs alpha et bêta-gamma. Pendant la période des essais nucléaires, les résultats de l'indice alpha global sont restés très proche de la limite de détection des mesures. En revanche, le suivi de l'indice bêta global était plus pertinent car, il traduisait fidèlement la contribution majoritaire des radionucléides émetteurs bêta-gamma d'origine artificielle présents dans les retombées. Cet indice fluctuait proportionnellement à l'importance des retombées associées aux essais atmosphériques.

IV.1.1 - INDICE BÊTA GLOBAL

La mesure de l'indice bêta global de l'air sur la totalité de la période des essais permet de suivre l'évolution au cours du temps des contributions relatives des radionucléides d'origine naturelle et artificielle. L'évolution de la moyenne annuelle de cet indice à la station Kathie, qui fonctionnait même en l'absence de tout personnel à Mururoa lors de la réalisation d'un essai, permet de distinguer trois phases (Fig. 65). Une première phase, de 1966 à 1975, recouvre celle des essais atmosphériques. Caractérisées par des fluctuations importantes, les valeurs maximales proches de 0,03 Bq.m^{-3} ont été atteintes lors de la première campagne d'essais en 1966. La deuxième phase débute l'année suivant l'arrêt des essais atmosphériques, avec la décroissance de l'indice bêta global suivant deux périodes successives : une baisse marquée par des fluctuations importantes jusqu'en 1975, puis plus rapide et sans fluctuation jusqu'en 1980, année où est atteint le bruit de fond naturel de l'ordre de 2.10^{-4} Bq.m^{-3}. La troisième phase, allant de 1980 à nos jours, montre des niveaux stables caractéristiques du bruit de fond naturel.

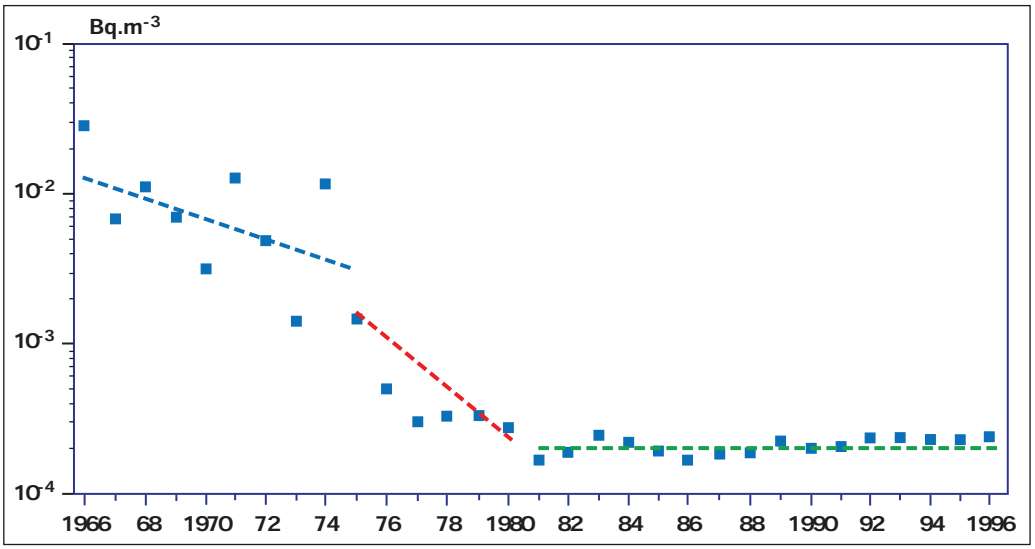


FIG. 65. - Évolution de la moyenne annuelle de l'indice bêta global (Bq.m^{-3}) des aérosols prélevés sur l'atoll de Mururoa, à la station Kathie, entre 1966 et 1996.

Lors des essais atmosphériques, des fluctuations journalières importantes se superposaient à la tendance moyenne annuelle décrite précédemment. L'indice bêta global de l'atmosphère à la station Kathie montrait des variations journalières significatives de plus de trois ordres de grandeur, reflétant les fluctuations des retombées locales les jours qui suivaient l'essai (Fig. 66). Les niveaux de l'indice bêta global dépendaient étroitement du mode et du lieu de l'essai, ainsi que des conditions météorologiques locales pendant les jours suivant l'essai.

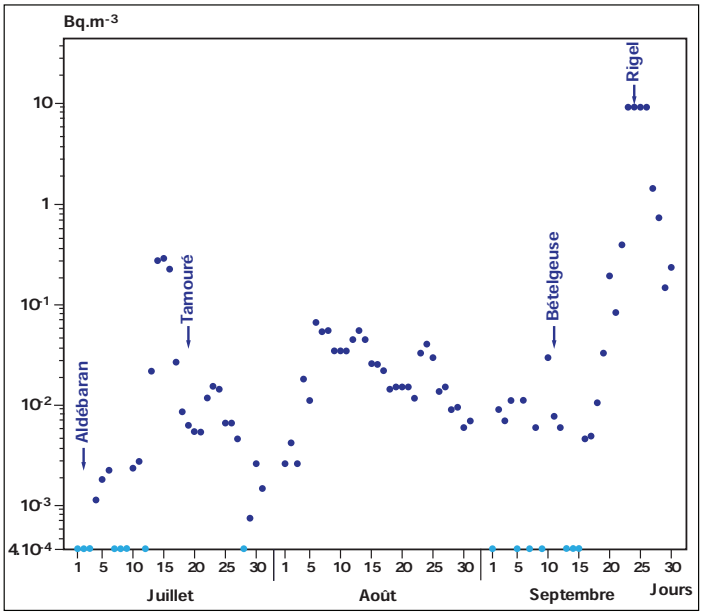


FIG. 66. - Évolution journalière de l'indice bêta global (Bq.m^{-3}) des aérosols prélevés à la station Kathie durant la campagne d'essais de 1966.

L'évolution journalière de l'indice bêta global intégrait donc les contributions des retombées locales immédiatement après l'essai, mais aussi les retombées différées au cours du temps des essais les jours et semaines précédents. Comme cela était prévu par la décroissance caractéristique du mélange de radionucléides généré par les essais (cf. Chapitre II), une vingtaine de jours après la fin de chaque campagne, l'indice bêta global de l'atmosphère revenait progressivement au niveau de celui caractérisant la troposphère de l'hémisphère Sud (Fig. 67).

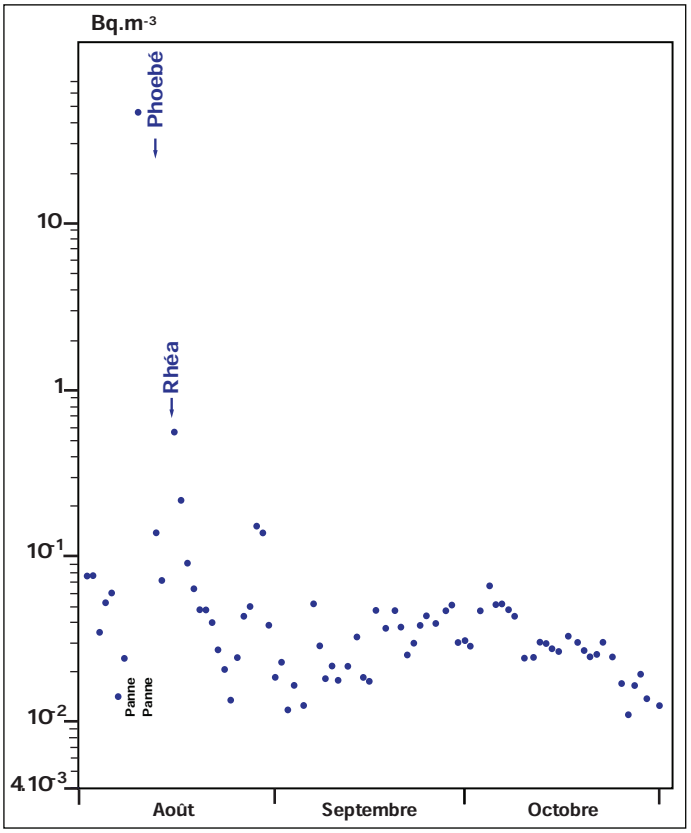


FIG. 67. - Évolution journalière de l'indice bêta global (Bq.m^{-3}) des aérosols prélevés à la station Kathie à la suite des retombées des essais Phoebé et Rhéa, des 8 et 14 août 1971. Les retombées immédiates ont été suivies, fin août, de retombées différées puis, en septembre, d'un retour au niveau de l'activité volumique d'avant la série d'essais.

D'autres sources de fluctuations locales de la radioactivité ont été mises en évidence. Ainsi, les radionucléides initialement déposés au sol pouvaient être remis en suspension par les vents et conduire très localement à des augmentations de l'activité volumique atmosphérique allant jusqu'à un facteur 100 entre les stations (Fig. 68), l'activité volumique maximale restant cependant inférieure à la $CMA_{air\ 168h}$.

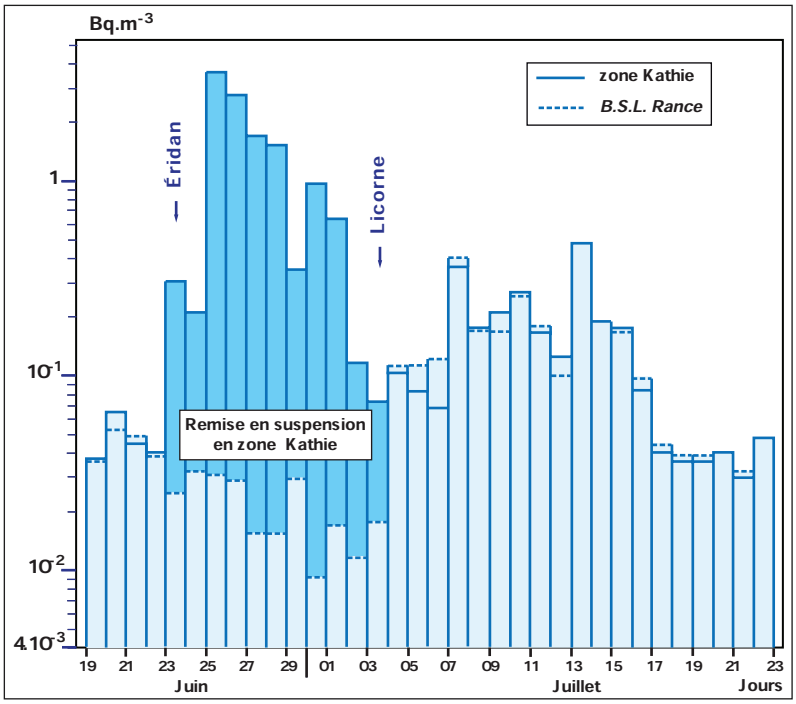


FIG. 68. - Évolution de l'indice bêta global ($Bq.m^{-3}$) de juin à juillet 1970 à la station Kathie, à terre, et sur le *BSL Rance* embossé en mer. Les différences significatives observées entre les deux stations pendant les 11 jours suivant l'essai Éridan ont été attribuées à la remise en suspension des radionucléides à la station Kathie, processus qui n'était pas susceptible de se produire à la station en mer.

Dès 1980, la valeur de l'indice bêta global atmosphérique n'a plus montré de fluctuation aussi importante, restant dans l'amplitude des variations naturelles du bruit de fond des atolls.

IV.1.2 - RADIONUCLÉIDES ÉMETTEURS BÊTA-GAMMA

Dans les années 80, la radioactivité artificielle des différentes composantes de l'environnement ayant décru rapidement après l'arrêt des essais atmosphériques, l'objectif principal de la surveillance radiologique était de vérifier le confinement, au sein du massif géologique, des radionucléides produits par les essais souterrains. Il s'agissait de mesurer l'évolution de traces de radioactivité. L'amélioration des analyses radiochimiques, associée à l'utilisation d'appareillages de comptage bas bruit de fond, permit de quantifier les radionucléides au niveau des traces. Dès lors, les radionucléides émetteurs bêta et bêta-gamma contribuant à l'activité de l'indice bêta global ont fait l'objet d'un suivi différencié.

Les radionucléides émetteurs bêta-gamma ayant les activités volumiques les plus élevées dans les aérosols sont d'origine naturelle : ^{7}Be, ^{22}Na, ^{40}K et ^{210}Pb. Les ^{7}Be et ^{22}Na sont considérés comme les traceurs d'apports des hautes couches de l'atmosphère tandis que ^{40}K et ^{210}Pb sont les traceurs des émissions telluriques.

L'activité volumique des radionucléides émetteurs bêta-gamma d'origine artificielle, en particulier celle du ^{137}Cs, étant plus faible que celle des radionucléides d'origine naturelle, les mesures s'effectuaient sur les filtres regroupés mensuellement. Entre 1985 et 1990, les résultats en ^{137}Cs n'étaient pas significativement supérieurs aux limites de détection standards, de l'ordre de 5.10^{-7} $Bq.m^{-3}$.

À partir de 1991, les mesures ont été réalisées dans les installations du Laboratoire souterrain de Modane afin de quantifier les radionucléides à l'état de traces sur les filtres regroupés par semestre. Depuis cette date, l'activité volumique moyenne en ^{137}Cs est mesurée à des niveaux très faibles, entre 5.10^{-8} et 3.10^{-7} Bq.m^{-3} (Fig. 69).

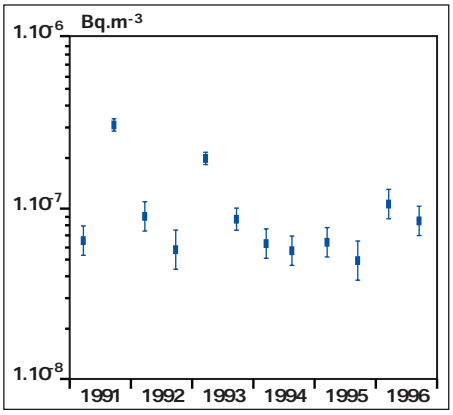


FIG. 69. - Évolution semestrielle de l'activité volumique (Bq.m^{-3}) en ^{137}Cs des aérosols prélevés, de 1991 à 1996, à la station Martine située dans le secteur Est de l'atoll de Mururoa.

IV.1.3 - ISOTOPES DU PLUTONIUM

De 1986 à 1996, durant la période finale des essais souterrains, l'évolution de la radioactivité atmosphérique en $^{239+240}Pu$ atteignit ponctuellement une valeur maximale de 7.10^{-7} Bq.m^{-3} en 1987 à la suite des travaux d'assainissement entrepris en secteur Nord de l'atoll de Mururoa utilisé pour les essais de sécurité (Fig. 70). En 1996, l'activité volumique revenait à un niveau identique à celui de 1986, soit environ 10^{-8} Bq.m^{-3}.

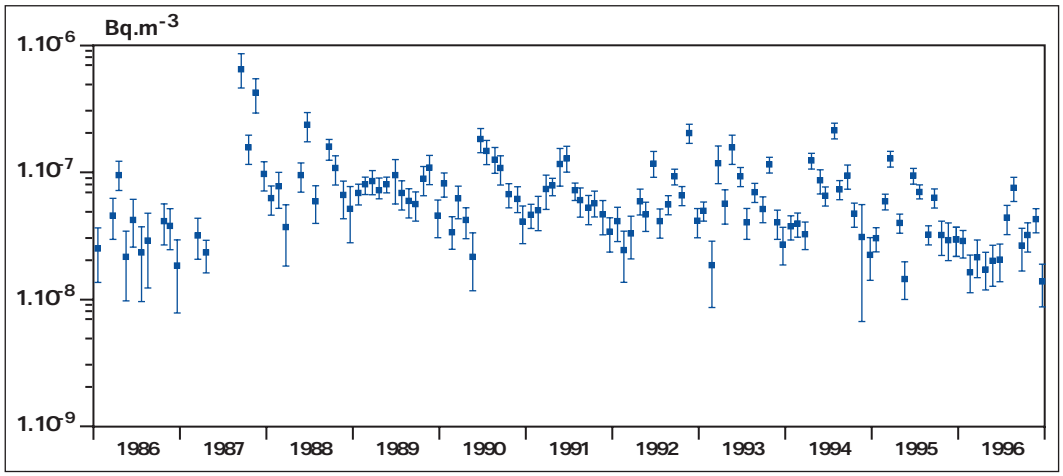


FIG. 70. - Évolution mensuelle de l'activité volumique en $^{239+240}Pu$ (Bq.m^{-3}) des aérosols prélevés, de 1986 à 1996, à la station Martine, sur l'atoll de Mururoa.

IV.2 - SOLS

Les principaux radionucléides d'origine naturelle présents dans les sols de Mururoa et Fangataufa apparaissent à des niveaux d'activité massique homogènes et comparables à ceux des autres atolls polynésiens (Tableau 15). Le rapport $^{226}Ra/^{232}Th$ est en général proche de 1 à Mururoa. Des variations de ce rapport sont observées entre les secteurs de l'atoll traduisant des proportions variables de corail dans les échantillons de sols analysés.

Durant la période des essais atmosphériques, compte tenu des délais d'accès sur site pour les prélèvements d'échantillons de sol et du temps nécessaire à leur préparation et mesure, les radionucléides caractérisés par les périodes de décroissance les plus courtes, inférieures à quelques heures, n'étaient plus détectés. En revanche, le cortège de radionucléides de période radioactive supérieure à 4 ans, essentiellement ^{155}Eu, ^{60}Co, ^{90}Sr et ^{137}Cs, a été mesuré en association avec les radionucléides à vie longue comme l'^{241}Am et les isotopes du plutonium, ^{238}Pu et $^{239+240}$Pu.

TABLEAU 15.
Moyenne des résultats de mesure de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) des sols prélevés dans différents secteurs de l'atoll de Mururoa.

Secteur	Chaînes naturelles en Bq.kg^{-1} sec			Nombre de prélev.
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Nord	2,73 ± 0,16	1,69 ± 0,16	12,1 ± 1,7	5
Aéroportuaire	1,81 ± 0,14	1,27 ± 0,14	11,5 ± 1,7	22
Est	2,18 ± 0,16	1,41 ± 0,15	12,7 ± 1,9	75

IV.2.1 - RADIONUCLÉIDES ÉMETTEURS BÊTA-GAMMA

Les paragraphes suivants traitent des distributions horizontale et verticale dans les sols de ^{155}Eu, ^{60}Co, ^{90}Sr et ^{137}Cs, ainsi que de ^{241}Am, radionucléide émetteur gamma de faible énergie mesuré par spectrométrie gamma. Les résultats présentés sont issus des bilans établis au cours du temps après l'arrêt des essais atmosphériques.

IV.2.1.1 - MURUROA

Afin de préciser les variations géographiques de l'activité massique de ces radionucléides, une cartographie détaillée suivant cinq secteurs : le secteur Nord, le secteur aéroportuaire, le secteur d'activité à l'extrême Est de l'atoll, le secteur Sud, et le point Faucon, à l'extrême ouest de l'atoll, a été réalisée en 1992.

Secteur Est

En zone Martine-Anémone, le ^{137}Cs était le seul radionucléide émetteur bêta-gamma régulièrement détecté. En 1992, son activité massique, sensiblement constante sur tout ce secteur, ne dépassait pas 2 Bq.kg^{-1} sec (Fig. 71).

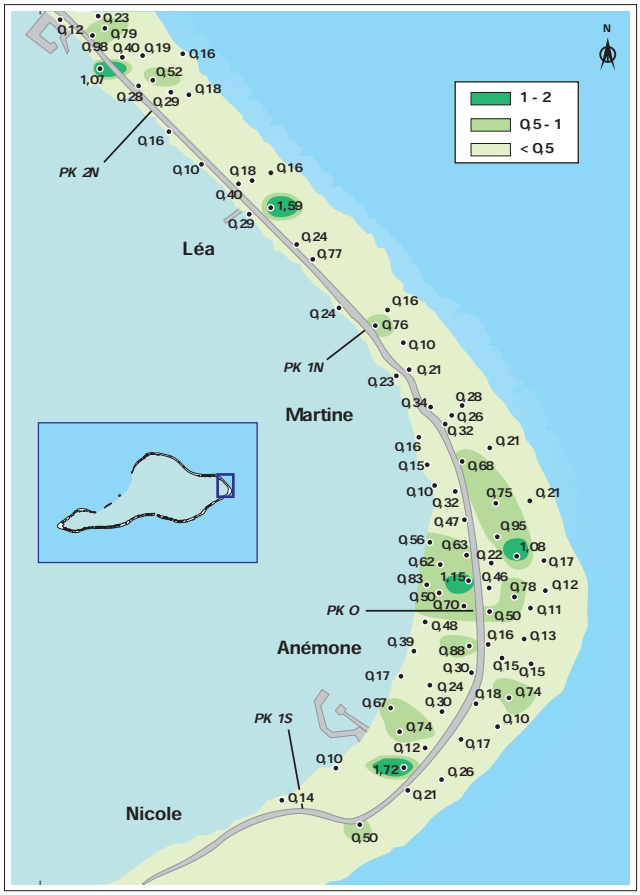


FIG. 71. - Cartographie de l'activité massique en ^{137}Cs (Bq.kg^{-1} sec) dans la couche la plus superficielle des sols prélevés, en 1992, dans le secteur Est de Mururoa.

Le ^{137}Cs se trouvait essentiellement dans la couche la plus superficielle des sols avec, en 1992, une moyenne de 0,7 Bq.kg^{-1} sec (Fig. 72). Au-dessous d'une profondeur de 12 cm, les activités massiques, proches de 0,4 Bq.kg^{-1} sec, étaient du même ordre de grandeur que celles observées dans les mêmes couches du secteur Sud. Les autres radionucléides, ^{60}Co, ^{241}Am et ^{155}Eu étaient présents à des niveaux d'activité moyens proches des limites de détection des techniques de mesure utilisées, respectivement 0,2, 0,7 et 6,1 Bq.kg^{-1} sec.

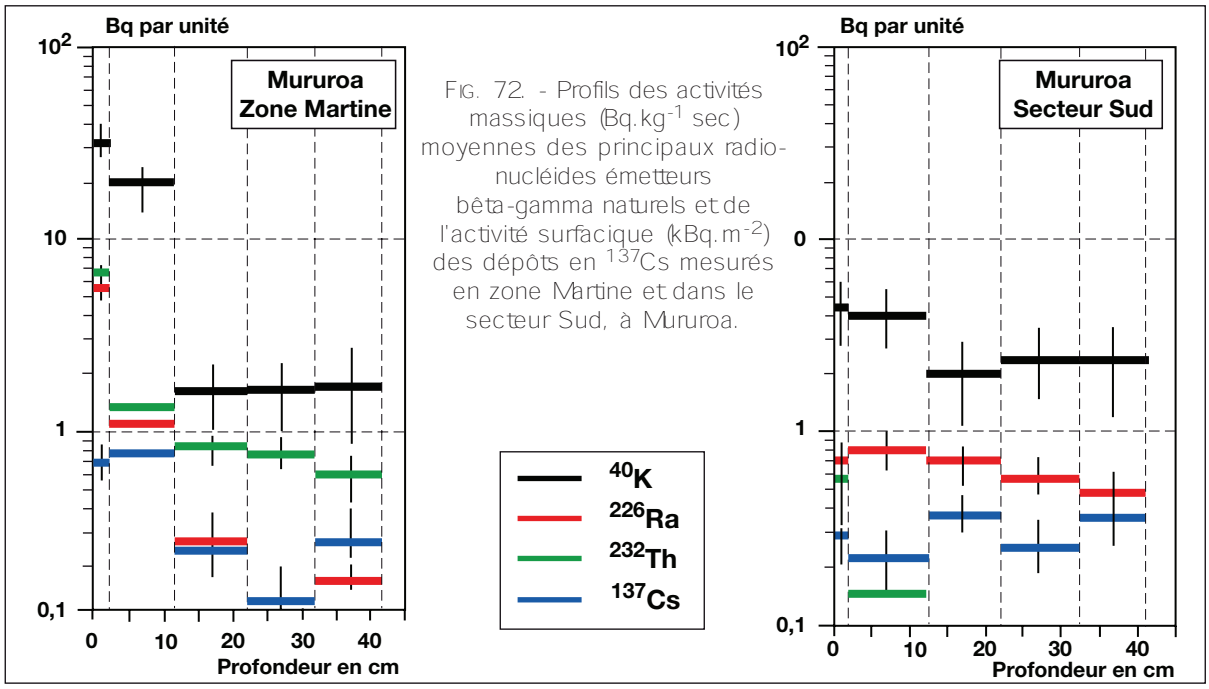


FIG. 72. - Profils des activités massiques (Bq.kg^{-1} sec) moyennes des principaux radionucléides émetteurs bêta-gamma naturels et de l'activité surfacique (kBq.m^{-2}) des dépôts en ^{137}Cs mesurés en zone Martine et dans le secteur Sud, à Mururoa.

Secteur Nord

Dans ce secteur, les mêmes radionucléides ont été détectés à des activités massiques plus élevées qu'en secteur Est, mais toujours inférieures à 10 Bq.kg^{-1} sec (Tableau 16).

Secteur Aéroportuaire

En 1992, la zone située le long de la piste d'aviation, montrait une quasi-absence de produits de fission et d'activation, avec des activités massiques inférieures à 1 Bq.kg^{-1} sec en ^{137}Cs et ^{60}Co et des niveaux inférieurs à la limite de détection en ^{155}Eu.

TABLEAU 16.
Activités massiques (Bq.kg^{-1} sec) des principaux radionucléides émetteurs bêta-gamma présents en secteur Nord de Mururoa, entre les zones Denise et Françoise.

Radionucléides	Activité minimale (Bq.kg^{-1} sec)	Activité maximale (Bq.kg^{-1} sec)
^{60}Co	0,1	3,4
^{137}Cs	0,3	6,0
^{155}Eu	1,3	2,1
^{241}Am	0,7	2,2

Secteur Ouest

En zone Faucon, ^{137}Cs et ^{241}Am étaient également présents en 1992, mais à des activités massiques plus faibles que dans le secteur Nord, tandis que les niveaux en ^{60}Co et ^{155}Eu restaient inférieurs aux limites de détection. Les niveaux d'activité des radionucléides décroissaient régulièrement avec la profondeur du sol (Fig. 73). La profondeur de pénétration du ^{137}Cs était d'ores et déjà plus importante que celle du $^{239+240}Pu$. Cela traduit une solubilité plus importante du césium qui a été entraîné plus rapidement par les eaux de pluie vers les horizons inférieurs du sol, sur 30 à 40 cm de profondeur.

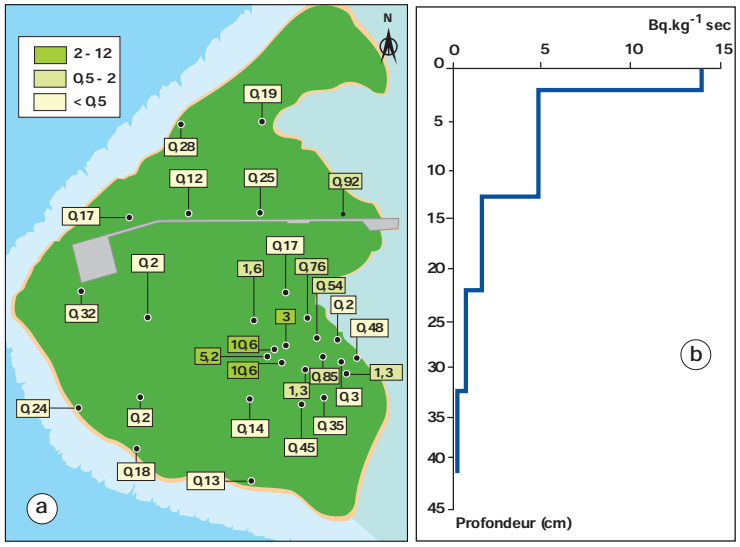


FIG. 73. - ^{137}Cs dans les sols prélevés en 1992, à Mururoa, en zone Faucon :

a : Cartographie de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) de la couche la plus superficielle.

b : Profils verticaux de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec).

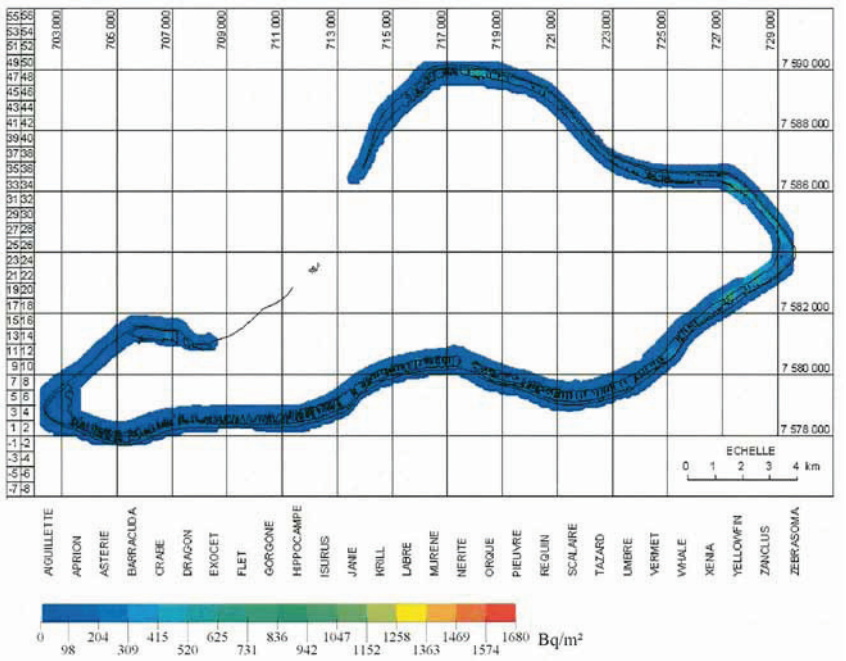


FIG. 74. - Cartographie des dépôts surfaciques (Bq.m^{-2}) du ^{137}Cs réalisée par spectrométrie gamma, par voie aérienne, sur l'atoll de Mururoa, en 1999.

Des cartographies gamma de l'ensemble des sols des deux atolls d'expérimentations, réalisées par voie aérienne en 1987 et 1999, ont permis de confirmer l'homogénéité de l'activité surfacique en ^{137}Cs et ce, à des niveaux d'activité très faibles (Fig. 74).

IV.2.1.2 - FANGATAUFA

Les radionucléides émetteurs bêta-gamma d'origine artificielle et de période radioactive supérieure à 1 an résultant des retombées de l'essai sur barge Rigel (24.09.1966) ont été également identifiés dans les sols de la zone Kilo, à Fangataufa (Tableau 17). En 1992, le rapport de l'activité de chacun de ces radionucléides avec celle du plutonium était relativement constant, tant en surface qu'en profondeur, démontrant qu'il n'y avait pas eu de fractionnement notable jusqu'à cette date. Ces résultats mettent en évidence une faible mobilité de ces radionucléides dans ce type de sol.

Le ^{137}Cs a été détecté sur l'ensemble de l'atoll. Son activité massique en surface variait de 0,47 $Bq.kg^{-1}$ sec en zone Fox, à 11,2 $Bq.kg^{-1}$ sec en zone Terme Sud et décroissait rapidement avec la profondeur (Fig. 75). Ces activités massiques étaient de deux ordres de grandeur inférieures à celles relevées dans la zone Kilo.

Des cartographies gamma de cette zone, réalisées par voie aérienne en 1999, confirmaient les activités surfaciques en ^{137}Cs et ^{60}Co estimées respectivement à 5 et 15 $kBq.m^{-2}$ (Fig. 76). En 1987, le ^{60}Co a été détecté en zone Pavillon à hauteur de 14,8 $Bq.kg^{-1}$ sec.

TABLEAU 17.
Activités massiques maximales ($Bq.kg^{-1}$ sec) des principaux radionucléides mesurés dans les échantillons de la couche superficielle des sols de la zone Kilo à Fangataufa.

Radionucléides	Activité maximale (1987)	Activité maximale (2000)
^{60}Co	1 200	210
^{90}Sr	1 500	1 100
^{125}Sb	300	10
^{137}Cs	250	190
^{155}Eu	1 500	240
^{241}Am	250	250

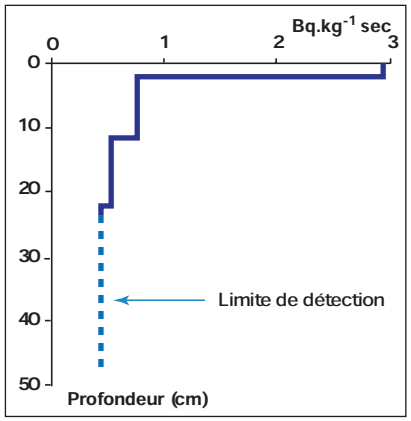


FIG. 75. - Profils verticaux de l'activité massique du ^{137}Cs ($Bq.kg^{-1}$ sec) dans le sol de la zone Marvi, à Fangataufa, prélevé en 1995.

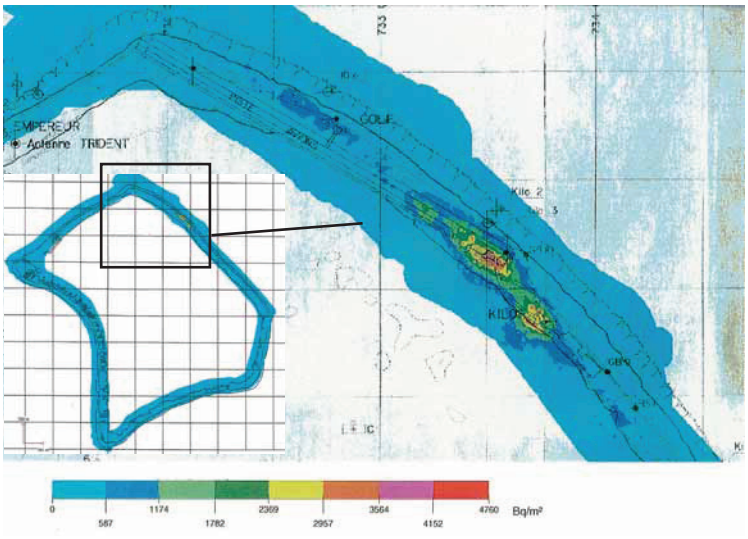


FIG. 76. - Cartographie des dépôts surfaciques ($Bq.m^{-2}$) du ^{137}Cs réalisée par spectrométrie gamma, par voie aérienne, de la zone Kilo de Fangataufa en 1999.

Les niveaux maximums observés en zone Kilo résultent des retombées immédiates de l'essai sur barge Rigel en 1966.

IV.2.2 - ISOTOPES DU PLUTONIUM

IV.2.2.1 - MURUROA

En 1992, l'activité massique résiduelle du plutonium a fait l'objet d'une cartographie détaillée à partir des résultats en $^{239+240}Pu$ obtenus sur des échantillons prélevés sur les cinq mêmes secteurs que ceux définis précédemment (Fig. 77). L'activité massique résiduelle était généralement inférieure à 20 $Bq.kg^{-1}$ sec. Cependant, deux secteurs de l'atoll montraient des niveaux plus élevés, à l'ouest de la zone Faucon et au nord, le long de la piste d'aviation.

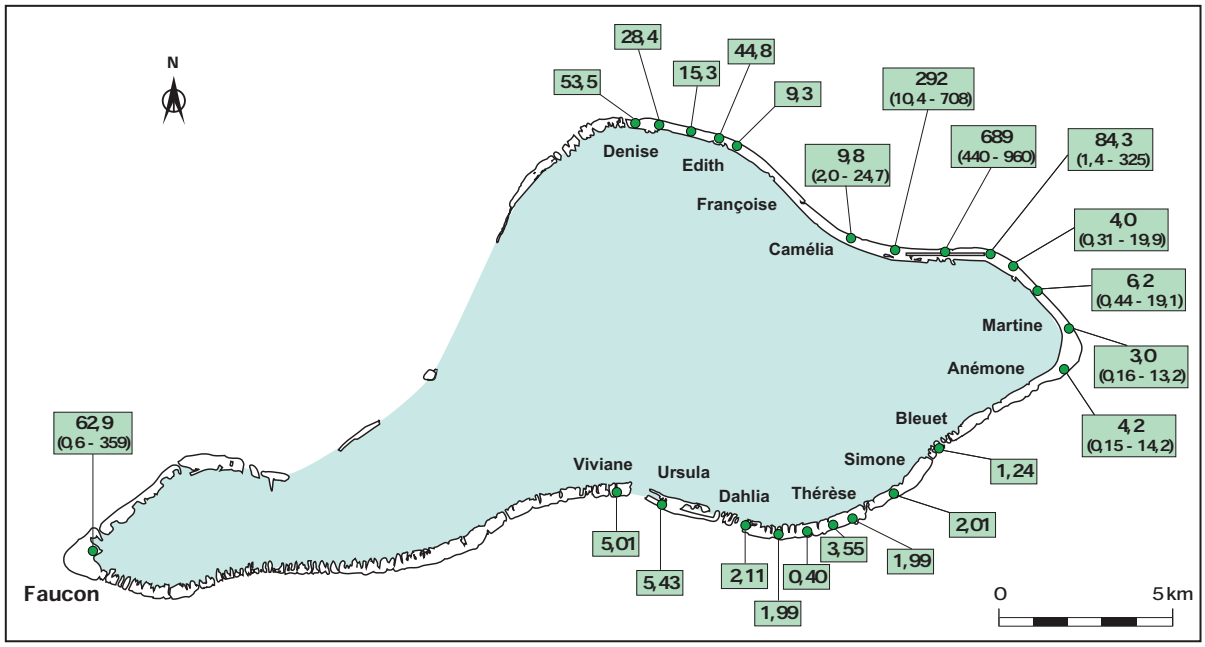


FIG. 77. - Cartographie de l'activité massique ($Bq.kg^{-1}$ sec) en $^{239+240}Pu$ de la couche superficielle des sols prélevés en 1992 à Mururoa. *Les minimales et les maximales sont données entre parenthèses.*

Secteur Nord

Entre les zones Denise et Françoise, les activités massiques des isotopes du plutonium s'avéraient plus élevées qu'en secteur Est. L'amplitude des activités massiques en ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$ étaient de 1,2-4,7 et 9,0-53,5 $Bq.kg^{-1}$ sec. Le rapport d'activité $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ y variait, de 3% à 23%.

Toujours en secteur Nord de l'atoll, à l'ouest de la zone Denise, les trois *motu* Colette, Ariel et Vesta utilisés pour des essais de sécurité étaient initialement constitués d'une dalle corallienne recouverte par endroits d'une fine couche de sable. Cette dalle, alors exempte de toute végétation, demeure aujourd'hui encore peu favorable au développement de végétaux.

Les cinq expériences de sécurité, sans réaction de fission, Ganymède, Ariel, Vesta, Bélier, Persée, effectuées entre 1966 et 1974 ont conduit à la dispersion de ^{239}Pu sur une surface de 190 000 m^2. Après chaque expérience, les débris les plus importants étaient ramassés et les dépôts résiduels de plutonium fixés sur la dalle par épandage d'une émulsion de bitume (cf. Chapitre VII).

En 1981, des dépressions tropicales entraînèrent l'arrachage des parties goudronnées de cette zone (cf. les modalités de l'assainissement de la zone Colette, Chapitre VII). Après ces tempêtes, une partie du ^{239}Pu était toujours fixé dans les premiers centimètres de la dalle corallienne de ces trois *motu*. En 1986, après les campagnes d'assainissement menées entre 1981 et 1985, un bilan de la radioactivité résiduelle de ces zones a été dressé à partir de 145 000 mesures radiologiques. À cette date, de l'ordre de $3,5.10^{10}$ Bq (soit de l'ordre de 15 g) de plutonium restaient fixés dans le bitume et dans la dalle corallienne.

Après le dernier assainissement, en 1987, la situation radiologique de ces trois *motu* a été établie lors d'une campagne de mesures (Fig. 78). L'activité totale en ^{239}Pu a été estimée à $1,5.10^{10}$ Bq, 80 % de l'activité se trouvant sur le *motu* Colette et l'activité surfacique des points les plus actifs était de l'ordre de 10^6 Bq.m^{-2}. Cette radioactivité résiduelle était intimement liée au support corallien induré. Les contrôles réalisés sur les chaussures et les vêtements du personnel après des séjours prolongés sur ces zones ont confirmé que cette activité était fixée et peu labile. Les prélèvements d'aérosols par filtration de grands volumes d'air ont confirmé l'absence de remise en suspension de particules marquées en plutonium.

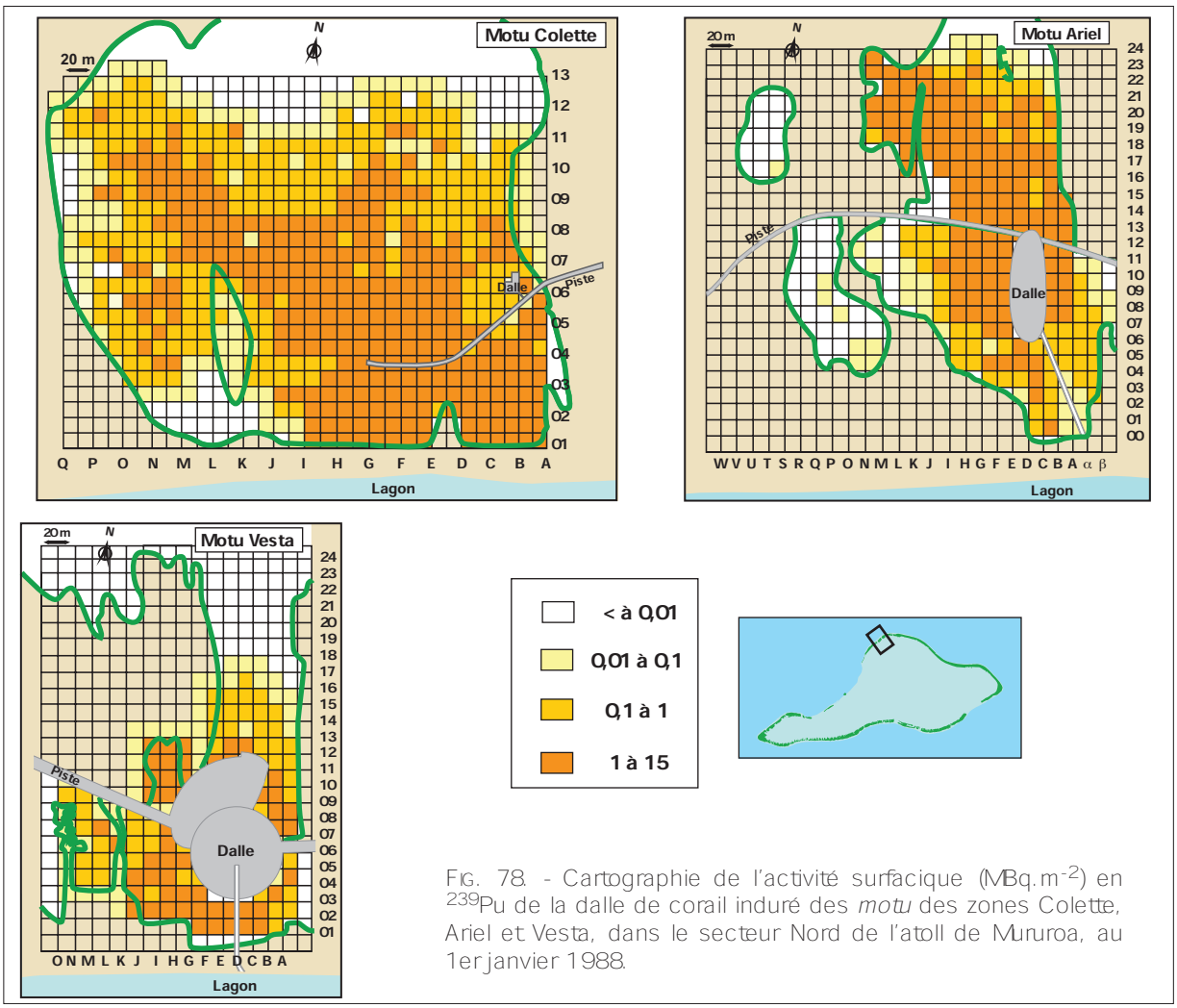


FIG. 78. - Cartographie de l'activité surfacique (MBq.m^{-2}) en ^{239}Pu de la dalle de corail induré des *motu* des zones Colette, Ariel et Vesta, dans le secteur Nord de l'atoll de Mururoa, au 1er janvier 1988.

Secteur aéroportuaire

À l'exception de la bordure de la piste d'aviation, le secteur aéroportuaire compris entre les zones Camélia et Kathie présentait, en 1992, des activités massiques intermédiaires entre celles du secteur Nord et celles du secteur Est (Fig. 79). L'activité massique moyenne en $^{239+240}$Pu y était d'environ 9 Bq.kg^{-1} sec.

Le secteur situé le long de la piste d'aviation a été utilisé en 1987 pour stocker des agrégats très faiblement radioactifs provenant de déchets issus de travaux d'assainissement menés en secteur Nord. Les activités massiques les plus élevées en $^{239+240}$Pu de ce secteur étaient comprises entre 300 et 1 000 Bq.kg^{-1} sec, le rapport ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu y était homogène et faible d'environ 0,5 %.

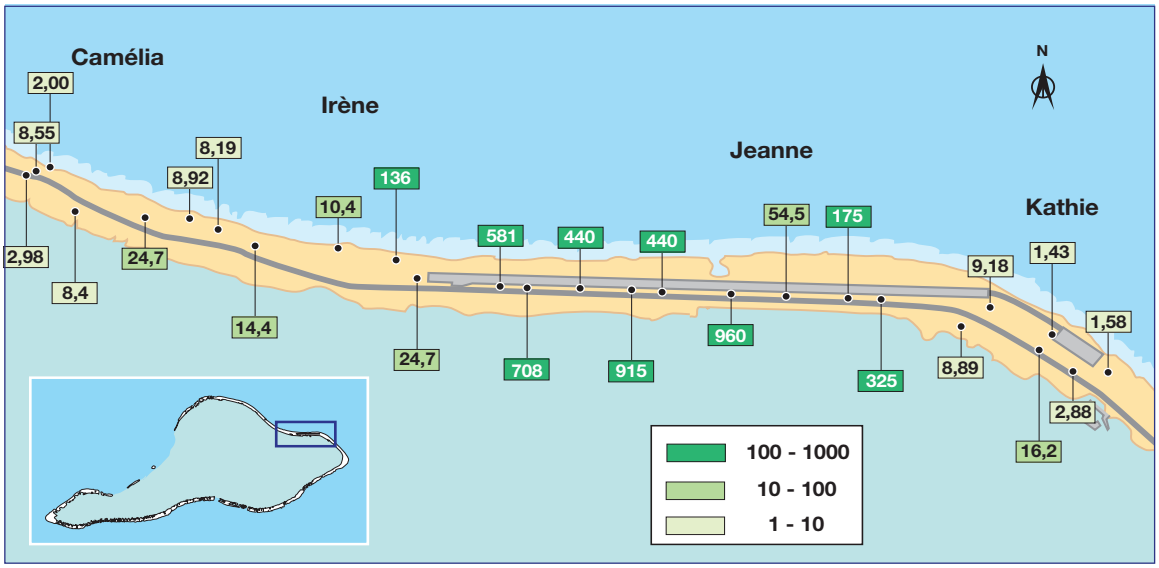


FIG. 79 - Cartographie de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en $^{239+240}$Pu de la couche superficielle des sols du secteur aéroportuaire, entre les points Camélia et Kathie, de l'atoll de Mururoa.

Secteur Est

La plus grande partie des infrastructures (installations techniques, logements, ...) d'une superficie d'environ 0,75 km^2, était regroupée dans le secteur Est de l'atoll, entre les zones Kathie et Nicole. Depuis 1966, les sols de ces zones avaient subi de multiples remaniements. Leur activité massique en $^{239+240}$Pu était faible ; la valeur moyenne s'élevant à environ 4 Bq.kg^{-1}, pour un maximum de 20 Bq.kg^{-1} (Fig. 80). Les profils verticaux montraient que l'activité était généralement présente uniquement dans les premiers centimètres en surface (Fig. 81).

L'activité totale en $^{239+240}$Pu de ce secteur a été estimée à environ 3.10^8 Bq, à partir de mesures de l'activité massique d'échantillons de la couche de surface et suivant des profils et en considérant une densité moyenne des sols égale à 1. Lorsque le ^{238}Pu était décelable, le rapport d'activité ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu présentait des fluctuations importantes, de 1 % à 22 %, traduisant les différentes origines de ce radionucléide.

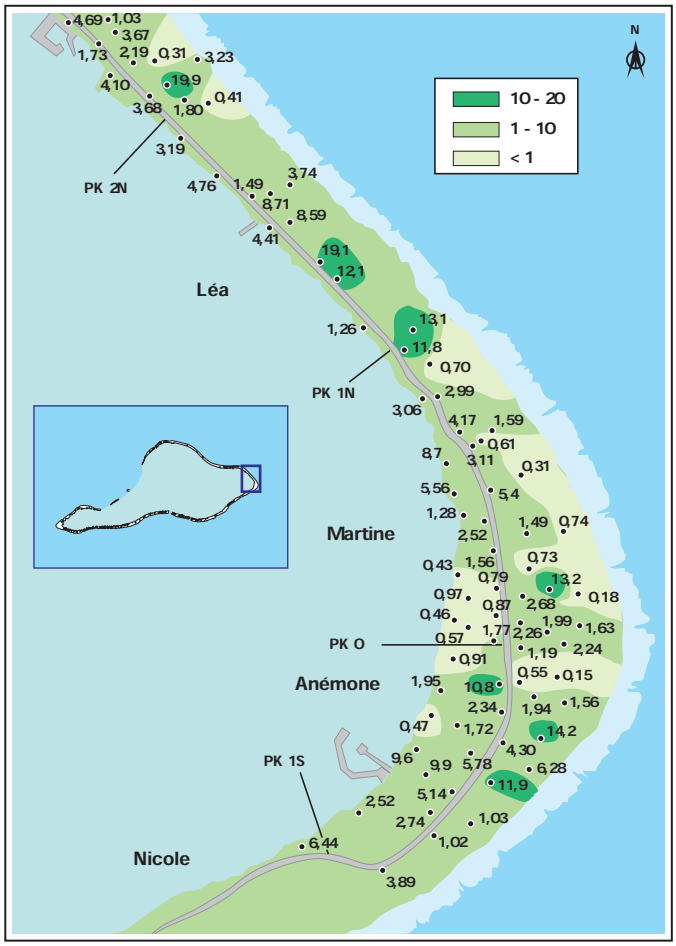
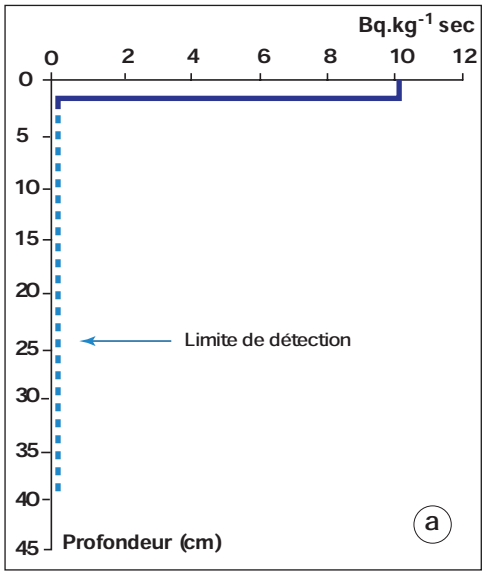


FIG. 80. - Cartographie de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en $^{239+240}$Pu de la couche superficielle des sols du secteur Est de Mururoa.



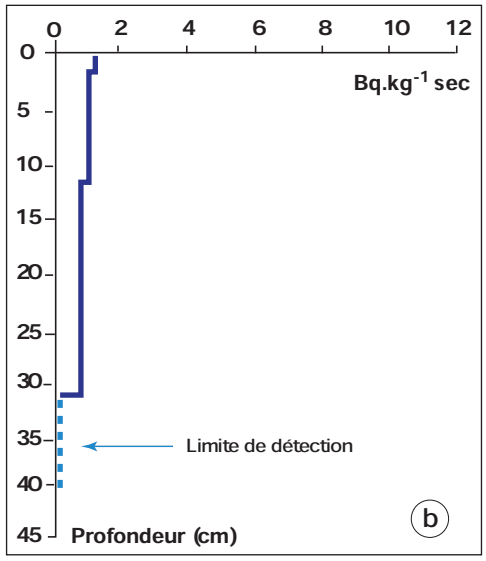
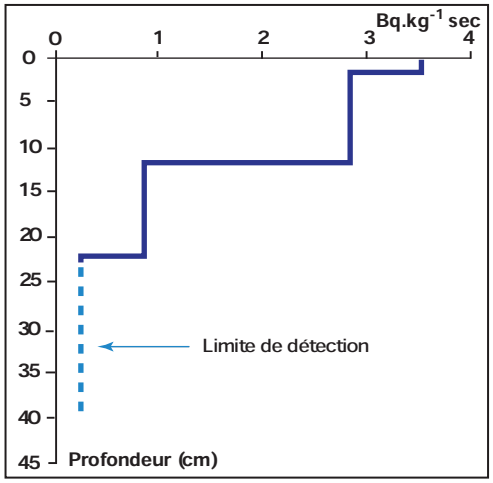


FIG. 81. - Profil de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en $^{239+240}$Pu des sols des zones Léa (a) et Martine (b) du secteur Est de Mururoa.



Secteur Sud

La radioactivité des sols y est sensiblement identique à celle déterminée en secteur Est, tant pour les radionucléides identifiés, que pour les niveaux d'activité massique observés (Fig. 77 et 82).

FIG. 82. - Profil de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en $^{239+240}$Pu des sols de la zone Thérèse dans le secteur Sud de Mururoa.

Secteur Ouest-Zone Faucon

L'essai Parthénope, de très faible énergie, réalisé sous ballon, le 24 août 1973, a engendré des retombées locales sur la zone Faucon. Les activités massiques en $^{239+240}$Pu étaient, en 1992, toujours plus élevées au sein des deux premiers centimètres du sol du *motu* (Fig. 83). Cependant, l'activité massique de ces isotopes dans la couche de surface des sols était très hétérogène avec les valeurs les plus faibles dans la partie Sud-Est du *motu* et les plus élevées (359 Bq.kg^{-1} sec) dans la partie Nord-Est (Fig. 84).

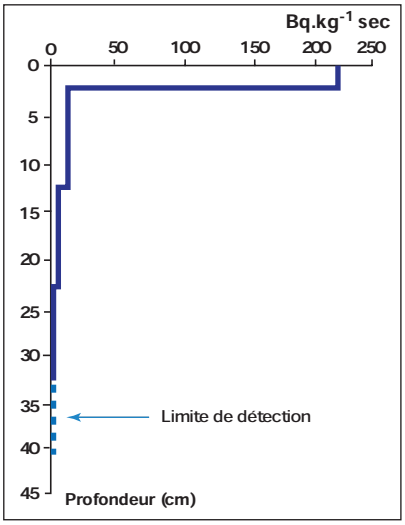


FIG. 83. - Profils verticaux de l'activité massique du $^{239+240}$Pu (Bq.kg^{-1} sec) du sol du *motu* Faucon du secteur Ouest de l'atoll de Mururoa.

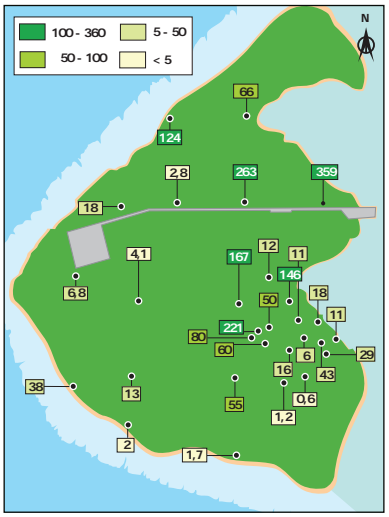


FIG. 84. - Cartographie de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en $^{239+240}$Pu de la couche superficielle des sols de la zone Faucon, de l'atoll de Mururoa.

Le ^{238}Pu était également présent, mais à des niveaux moins élevés, conduisant à un rapport d'activité ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu faible, compris entre 0,5 et 4,5 %.

IV.2.2.2 - FANGATAUFA

En 1966, les retombées locales de l'essai atmosphérique Rigel ont entraîné un dépôt de produits de fission sur les sols du secteur Nord-Est de l'atoll. Les retombées se sont déposées suivant deux axes, l'un passant par la zone Empereur, l'autre par la zone Kilo (Fig. 85). La zone Empereur a fait l'objet d'une première opération de remédiation dès 1967, par décapage du sol sur une profondeur de 50 cm.

Un bilan radiologique des sols de l'atoll de Fangataufa a été réalisé en 1986 et 1987. L'activité massique en $^{239+240}$Pu de la couche de surface de ces deux zones variait entre la limite de détection des mesures (0,5 à 1 Bq.kg^{-1} sec) et la valeur maximale de 5 000 Bq.kg^{-1} sec.

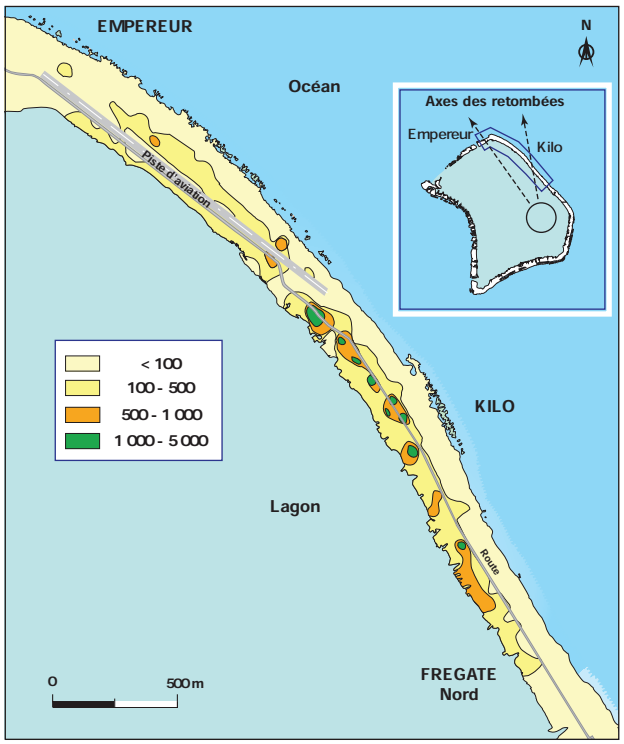
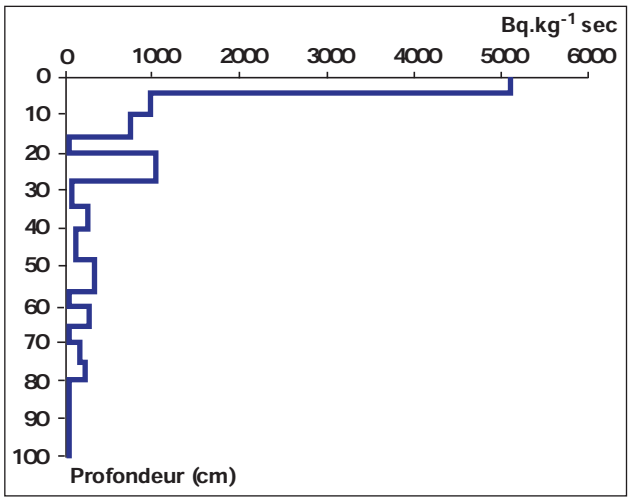


FIG. 85. - Cartographie de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en $^{239+240}$Pu de la couche superficielle des sols, entre les points Empereur et Frégate à Fangataufa.

Les *maxima* d'activité ont été observés entre l'extrémité Sud de la piste d'aviation et le point Frégate-Nord (Fig. 85).



L'activité massique en $^{239+240}Pu$ décroissait avec la profondeur (Fig. 86). Les variations de l'activité de ces profils résultaient des différences de nature des couches de sol échantillonnées, horizons de sédiments meubles ou de corail compact. De 45 à 60 % de l'activité en plutonium se situait dans les 5 premiers centimètres. L'activité totale en $^{239+240}Pu$ dans les sols de cette zone a été estimée à $3,6.10^{10}$ Bq en prenant en compte une densité moyenne de 1,2 pour les sols.

FIG. 86. - Profil de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en $^{239+240}Pu$ des sols de la zone Kilo du secteur Nord de l'atoll de Fangataufa.

Le rapport d'activité $^{238}Pu/^{239+240}Pu$, sensiblement constant, tant en surface qu'en profondeur, était, en moyenne, égal à 40 %. Cette zone présentait une activité totale en ^{238}Pu estimée à $1,4.10^{10}$ Bq.

IV.2.3 - DÉBIT DE DOSE

Les débits de dose environnementaux, mesurés en différents points des atolls expérimentaux, ont présenté de très fortes variations pendant toute la période des essais atmosphériques. Les niveaux étaient proportionnels à l'intensité des retombées immédiates après l'essai. Le réseau de télémesures transmettait en temps réel les valeurs de débit de dose mesurées par les compteurs et les chambres d'ionisation, en particulier celles des zones où avaient lieu les essais. Ces informations, complétées par les mesures réalisées lors des missions de reconnaissance radiologique après l'essai, permettaient de délimiter les zones à accès contrôlé et de décider de l'entrée des membres du personnel sur ces zones, dès lors que la décroissance des niveaux de rayonnement le permettait. Les personnes intervenant sur ces zones étaient munies d'un dosimètre individuel permettant d'évaluer leur exposition externe éventuelle (cf. Chapitre VI).

Pendant la période des essais souterrains, les niveaux des débits de dose mesurés à la majorité des points des atolls étaient stables et correspondaient à l'exposition naturelle (260 à 320 µGy.an^{-1}), essentiellement due au rayonnement cosmique. Cependant, les points de mesure du débit de dose des zones Nicole et Dindon à Mururoa et de la zone Kilo à Fangataufa montraient localement des valeurs maximales proches de 500 µGy.an^{-1}.

Au point Nicole, l'augmentation était due à la proximité du laboratoire de mesures des échantillons provenant des cavités d'essais souterrains. Pendant la période du moratoire entre 1992 et 1994, l'irradiation ambiante de ce point, en l'absence d'échantillons à analyser, était du même niveau qu'aux autres points de mesure (Fig. 87a).

Au point Dindon, l'augmentation du débit de dose était due au Poste d'enregistrement avancé (PEA), ouvrage en béton dont les radionucléides des chaînes naturelles de l'uranium et du thorium sont à des niveaux d'activité plus élevés que ceux des sols environnants (Fig. 87b). Ce point de mesure a été déplacé de façon à s'affranchir de l'irradiation occasionnée par le béton.

Au point Kilo, l'augmentation provenait des dépôts résultant de l'essai sur barge Rigel de 1966, avec en particulier l'influence du ^{60}Co (Fig. 87c). En tenant compte d'un débit de dose de 280 $\mu Gy.an^{-1}$ pour la composante naturelle de l'irradiation, la composante due au ^{60}Co estimée à 140 $\mu Gy.an^{-1}$ en 1988, a décru au cours du temps, suivant la période radioactive de ce radionucléide (5,27 ans).

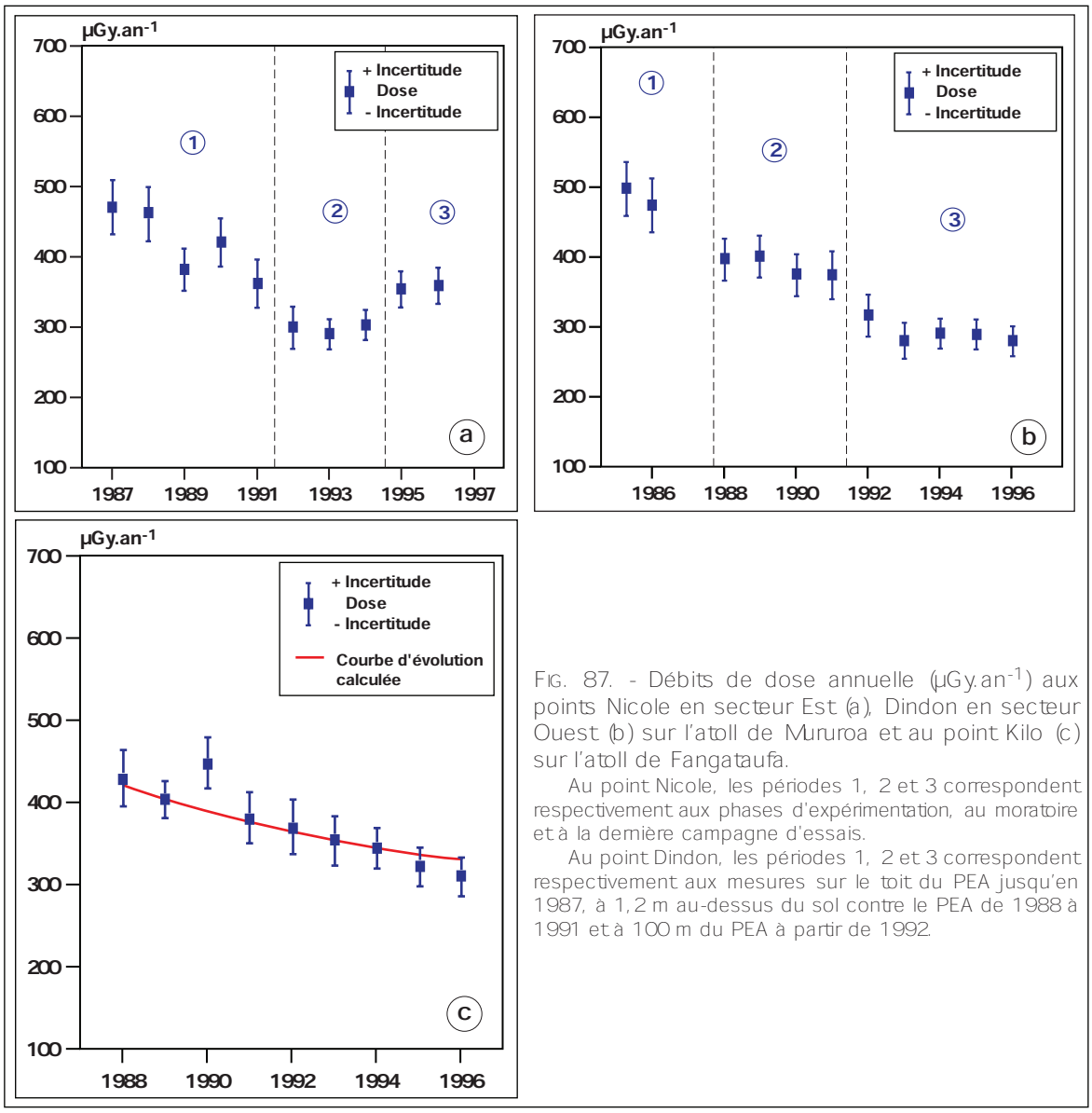


FIG. 87. - Débits de dose annuelle ($\mu Gy.an^{-1}$) aux points Nicole en secteur Est (a), Dindon en secteur Ouest (b) sur l'atoll de Mururoa et au point Kilo (c) sur l'atoll de Fangataufa.

Au point Nicole, les périodes 1, 2 et 3 correspondent respectivement aux phases d'expérimentation, au moratoire et à la dernière campagne d'essais.

Au point Dindon, les périodes 1, 2 et 3 correspondent respectivement aux mesures sur le toit du PEA jusqu'en 1987, à 1,2 m au-dessus du sol contre le PEA de 1988 à 1991 et à 100 m du PEA à partir de 1992.

De 1985 à 1996, en dehors des zones particulières qui viennent d'être décrites, les doses annuelles mesurées étaient comprises entre 260 et 320 µGy.an^{-1} pour la quasi-totalité des points de surveillance des deux atolls d'expérimentations (Fig. 88). Ces valeurs sont tout à fait représentatives de l'irradiation ambiante susceptible d'être mesurée sur des atolls coralliens polynésiens. La moyenne annuelle, calculée à l'aide de l'ensemble des mesures, s'établissait à 290 µGy.an^{-1} pour Mururoa et 280 µGy.an^{-1} pour Fangataufa. La valeur légèrement plus élevée de l'irradiation externe observée à Mururoa s'explique par le grand nombre de constructions et de voies bétonnées dont les activités, associées aux radionucléides des chaînes radioactives naturelles, sont plus importantes.

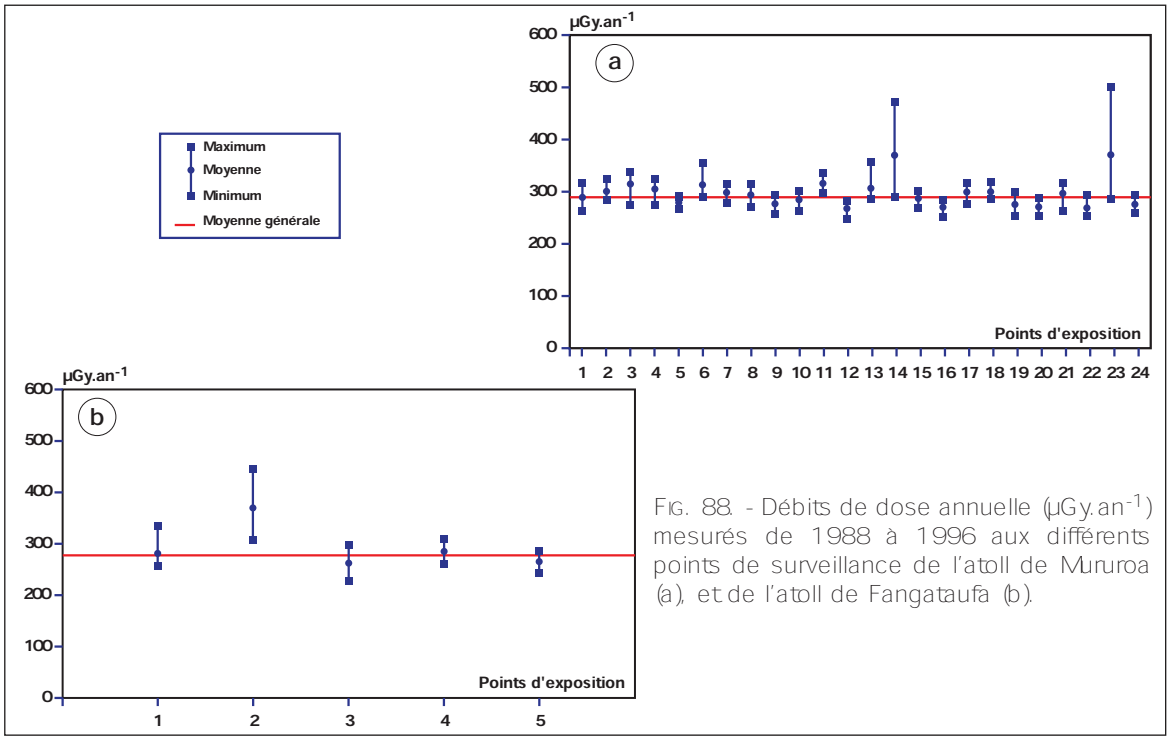


FIG. 88. - Débits de dose annuelle (µGy.an^{-1}) mesurés de 1988 à 1996 aux différents points de surveillance de l'atoll de Mururoa (a), et de l'atoll de Fangataufa (b).

IV.3 - PLANTES TERRESTRES

La surveillance radiologique du milieu terrestre, réalisée à partir de 1967, s'appuyait sur la collecte régulière d'une quinzaine d'espèces végétales qui ont fait l'objet de plus de 1 500 échantillons prélevés sur les deux atolls pendant la période d'activité des sites expérimentaux. Les résultats associés aux trois espèces les plus représentatives des sites : *Scaevola sericea*, *Casuarina equisetifolia* et *Cocos nucifera* sont présentés en fonction de la période radioactive des radionucléides mesurés : périodes courtes, moyennes et longues.

Durant la période des essais atmosphériques, comme pour les prélèvements de sol, les radionucléides caractérisés par les périodes de décroissance les plus courtes, inférieures à quelques heures, n'étaient plus détectés dans les échantillons. *A contrario*, le cortège de radionucléides émetteurs alpha et bêta-gamma, ayant des périodes radioactives supérieures au mois, mesuré dans l'atmosphère, a également été mis en évidence dans les différentes espèces prélevées sur les atolls de Mururoa et Fangataufa.

Ainsi, les radionucléides de période comprise entre 2 mois et un an, ^{95}Zr, ^{58}Co, ^{65}Zn, ^{57}Co, ^{54}Mn, ^{144}Ce et ^{106}Ru ont été détectés. Ils étaient associés à des radionucléides de période supérieure à 5 ans, essentiellement ^{60}Co, ^{90}Sr et ^{137}Cs. Un troisième groupe, celui des radionucléides à vie longue, comme les isotopes du plutonium, ^{238}Pu et $^{239+240}$Pu, était mesuré.

Ces radionucléides ont été quantifiés dans les échantillons biologiques pendant la phase initiale des essais atmosphériques, comme le montrent les dates de prélèvements des échantillons de *Scaevola sericea* présentant les activités massiques maximales de ces produits d'activation et de fission (Tableau 18).

TABLEAU 18.
Activités maximales (Bq.kg^{-1} poids frais) des principaux radionucléides mesurés dans les échantillons de feuilles de *Scaevola sericea* prélevés dans différentes zones de l'atoll de Fangataufa.
Les radionucléides sont classés en trois catégories : produits d'activation, produits de fission et matières fissiles.

Radionucléide et Période physique	Activité maximale	Date	Zone de prélèvement
^{58}Co *(70,8 jours)*	170	21.11.68	Empereur
^{65}Zn *(244 jours)*	140	21.11.68	Empereur
^{65}Zn *(244 jours)*	140	10.03.69	Kilo
^{57}Co *(272 jours)*	110	28.10.67	Kilo
^{54}Mn *(312 jours)*	70	10.03.69	Kilo
^{60}Co *(5,27 ans)*	51	27.08.69	Kilo
^{137}Cs *(30,2 ans)*	2 500	27.08.69	Kilo
^{137}Cs *(30,2 ans)*	1 500	21.11.68	Empereur
^{144}Ce *(284 jours)*	1 500	21.11.68	Empereur
^{144}Ce *(284 jours)*	1 100	28.10.67	Empereur
^{106}Ru *(373 jours)*	1 000	21.11.68	Empereur
^{95}Zr *(64 jours)*	740	17.09.70	Terme Sud
^{95}Zr *(64 jours)*	740	18.09.70	Pavillon
^{141}Ce *(32,5 jours)*	480	17.09.70	Terme Sud
^{90}Sr *(28 ans)*	170	27.08.69	Kilo
^{140}Ba *(12,8 jours)*	140	18.09.70	Pavillon
$^{239+240}$Pu *(24 300 et 6 600 ans)*	0,36	10.07.88	Kilo
^{238}Pu *(86 ans)*	0,13	10.07.88	Kilo

IV.3.1 - RADIONUCLÉIDES ÉMETTEURS BÊTA-GAMMA

IV.3.1.1 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE INFÉRIEURE OU ÉGALE À L'ANNÉE

Les valeurs maximales des principaux radionucléides de période courte ont été mesurées sur les feuilles de *Scaevola sericea* prélevées dans le secteur de Fangataufa s'étendant des zones Kilo à Empereur. Durant la période 1967-1968, les niveaux ont atteint 1 500 Bq.kg^{-1} frais en ^{144}Ce, 1 000 Bq.kg^{-1} frais en ^{106}Rh et 740 Bq.kg^{-1} frais en ^{95}Zr en zone Empereur (Tableau 18). ^{140}Ba, ^{141}Ce, ^{103}Ru, etc. ont également été détectés occasionnellement dans les échantillons de coprah et de lait de noix de coco, mais uniquement durant la période des essais atmosphériques et avec des niveaux toujours plus élevés dans les échantillons de coprah (Tableau 19).

IV.3.1.2 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE SUPÉRIEURE À 5 ANS

De 1982 à 1995, l'activité massique en ^{137}Cs était supérieure aux limites de détection pour 151 des 211 échantillons de feuilles de *Casuarina equisetifolia*, prélevés dans la partie Est

Radionucléide et Période physique	Eau de coco (70 échantillons)		Coprah (69 échantillons)	
	Activité maximale	Date	Activité maximale	Date
^{54}Mn *(312 jours)*	-	-	0,19 *(1)*	21.06.71
^{57}Co *(272 jours)*	0,33 *(1)*	04.10.72	21 *(5)*	04.05.70
^{60}Co *(5,27 ans)*	3,0 *(9)*	06.11.74	24 *(4)*	04.05.70
^{65}Zn *(244 jours)*	1,1 *(2)*	12.02.69	8,8 *(2)*	04.05.70
^{95}Zr *(64 jours)*	1,8 *(12)*	21.06.71	5,5 *(15)*	06.06.74
^{103}Ru *(39,3 jours)*	1,4 *(4)*	21.06.71	8,1 *(5)*	06.06.74
^{140}Ba *(12,8 jours)*	8,5 *(1)*	21.06.71	210 *(2)*	06.06.74
^{141}Ce *(32,5 jours)*	1,8 *(3)*	21.06.71	7,4 *(5)*	06.06.74
^{144}Ce *(284 jours)*	-	-	36 *(1)*	26.01.70

TABLEAU 19.
Activités maximales (Bq.kg^{-1} poids frais) des principaux radionucléides à vie courte mesurés dans les échantillons d'eau de coco et de coprah, issus de noix de coco prélevées de 1969 à 1974, sur l'atoll de Mururoa.

Le nombre de résultats de mesures significativement supérieurs à la limite de détection est donné entre parenthèses.

de l'atoll de Mururoa. Quel que soit le site de prélèvement, l'activité des principaux radionucléides détectés dans les feuilles de *Casuarina equisetifolia* était très inférieure à l'activité naturelle en ^{40}K, de 42 à 62 Bq.kg^{-1} frais.

Entre 1982 et 1995, l'activité massique annuelle en ^{137}Cs était comprise entre 0,09 et 1,3 Bq.kg^{-1} frais, avec un maximum de 6,6 Bq.kg^{-1} frais atteint en 1986. L'évolution annuelle de l'activité massique du ^{137}Cs, pour un même lieu de prélèvement, a décru suivant une période effective de l'ordre de 6 ans. La dispersion statistique autour de cette tendance a été attribuée à un taux de remise en suspension différent entre les points de collecte et à un taux de captation des poussières variable suivant la hauteur des feuilles des arbres échantillonnées (Fig. 89).

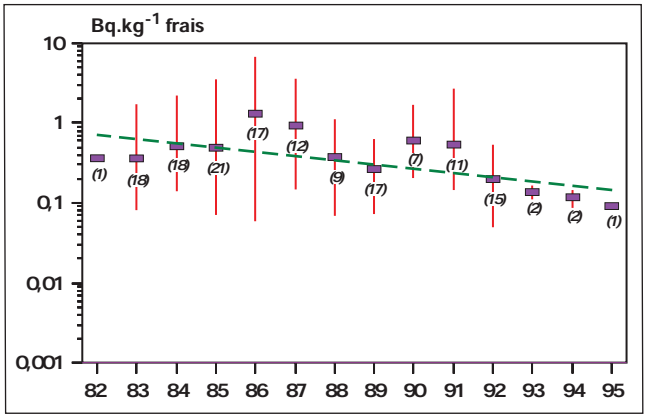


FIG. 89. - Évolution annuelle de l'activité massique (Bq.kg^{-1} poids frais) du ^{137}Cs dans les feuilles de *Casuarina equisetifolia*, prélevées dans le secteur Est de l'atoll de Mururoa, entre 1982 et 1995.
L'amplitude des résultats (minimum et maximum) est donnée autour de la valeur moyenne ainsi que le nombre de mesures entre parenthèses.



Détail du feuillage du *Casuarina equisetifolia*.

De 1968 à 1995, les activités massiques en ^{60}Co, ^{137}Cs et ^{90}Sr des feuilles de *Scaevola sericea* de la zone Kilo-Empereur de l'atoll de Fangataufa ont décru suivant une période effective de l'ordre de 3 à 4 ans (Fig. 90). La dispersion statistique des résultats de cette zone a été attribuée à l'hétérogénéité spatiale des dépôts des radionucléides dans le sol.

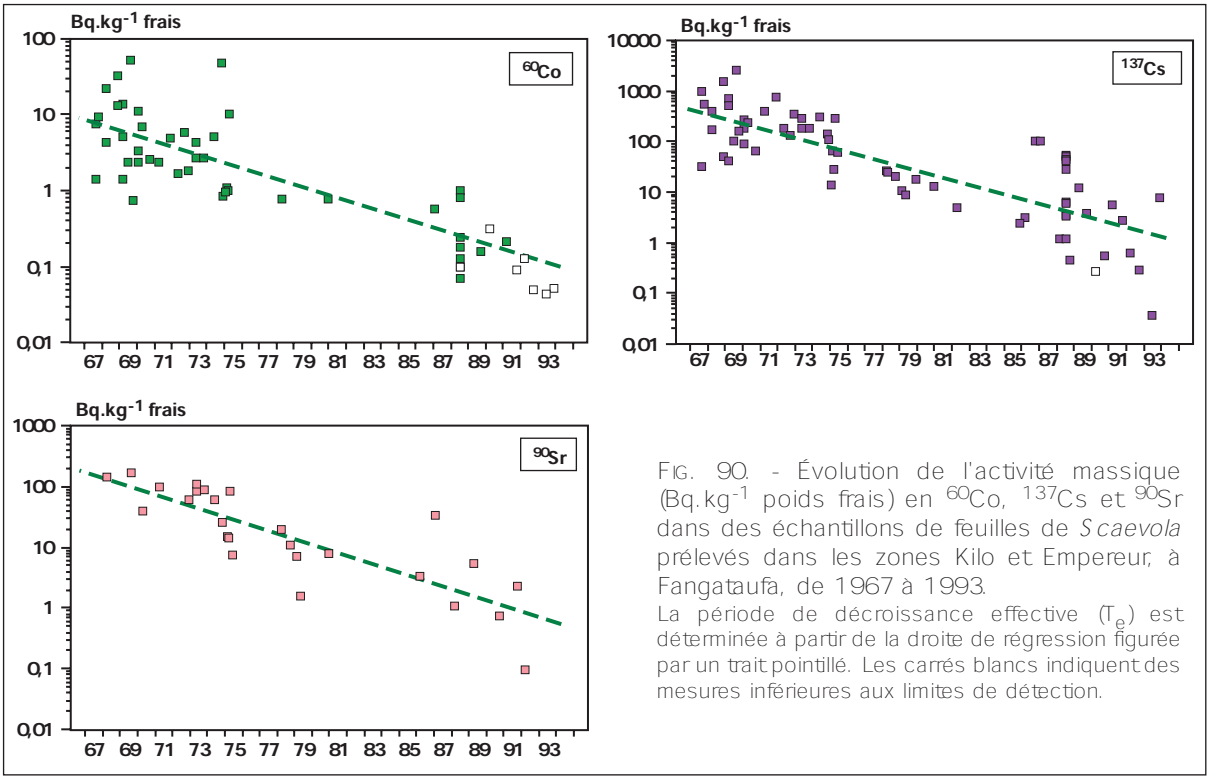


FIG. 90. - Évolution de l'activité massique (Bq.kg^{-1} poids frais) en ^{60}Co, ^{137}Cs et ^{90}Sr dans des échantillons de feuilles de *Scaevola* prélevés dans les zones Kilo et Empereur, à Fangataufa, de 1967 à 1993.
La période de décroissance effective (T_e) est déterminée à partir de la droite de régression figurée par un trait pointillé. Les carrés blancs indiquent des mesures inférieures aux limites de détection.

TABLEAU 20.
Activités massiques maximales (Bq.kg^{-1} poids frais) en ^{60}Co, ^{137}Cs et ^{90}Sr dans des échantillons de feuilles de *Scaevola* prélevés hors des zones Kilo-Empereur, à Fangataufa, de 1968 à 1992.

Radionucléide	Activité maximale (Bq.kg^{-1} frais)	Date	Secteur géographique
^{60}Co	2,5	21.11.68	Frégate - Echo
	7,7	24.11.68	Terme Sud
	16	19.08.74	Pavillon
^{137}Cs	170	03.12.69	Frégate - Echo
	30	17.09.70	Terme Sud
	70	07.10.86	Pavillon
^{90}Sr	8,1	11.06.80	Pavillon
	3	18.09.92	Frégate - Echo

Dans les autres secteurs de Fangataufa, les activités massiques en ^{60}Co, ^{137}Cs et ^{90}Sr des feuilles de *Scaevola* s'avéraient plus faibles (Tableau 20). Le ^{137}Cs était également le principal radionucléide détecté dans l'eau de coco et le coprah des noix collectées dans la principale cocoteraie, située dans la zone Martine-Anémone de Mururoa. Pour le coprah, l'activité massique est passée de 10 Bq.kg^{-1} frais en 1967, à quelques dixièmes de Bq.kg^{-1} frais en 1996 (Fig. 91). Pour ces deux types d'échantillons, la période de décroissance effective du ^{137}Cs était alors de 6 ans, c'est-à-dire 5 fois plus courte que la période radioactive de ce radionucléide.

La seconde cocoteraie, en zone Faucon, a subi à la fois les effets thermiques des explosions nucléaires et l'essentiel des retombées des essais effectués sur la zone Dindon, toute proche. Les activités massiques associées à cette cocoteraie, replantée après les essais atmosphériques, étaient plus élevées que celles présentes sur d'autres zones de l'atoll. Des valeurs maximales de 10 Bq.kg^{-1} frais dans le coprah et de 6,3 Bq.l^{-1} dans l'eau de coco ont été relevées en 1988.

Les résultats de mesure des intercomparaisons de l'AIEA de 1994 et 1996 étaient conformes à ceux obtenus dans le cadre de la surveillance radiologique des sites (Fig. 91). Ainsi, les activités massiques en ^{137}Cs d'échantillons d'eau de coco étaient de 0,095 et 0,11 Bq.kg^{-1} frais en 1996 dans les zones Anémone et Denise respectivement. Les échantillons des autres zones étaient caractérisés par des niveaux d'activité inférieurs aux limites de détection.

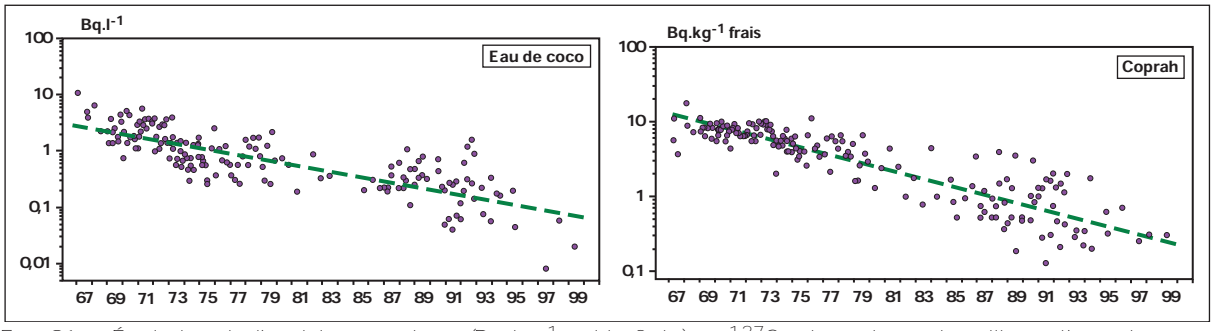


FIG. 91. - Évolution de l'activité massique (Bq.kg^{-1} poids frais) en ^{137}Cs dans des échantillons d'eau de coco et de coprah prélevés dans la partie Est de Mururoa, de 1967 à 1999.
La période de décroissance effective (T_e) est déterminée à partir de la droite de régression figurée par un trait pointillé.

Initialement, l'atoll de Fangataufa ne possédait pas de cocoteraie. Néanmoins, les activités massiques des sols y étant les plus élevées, il a été décidé de préciser les facteurs de transfert sol-plante en y réalisant des études *in situ* (cf. Chapitre II). À cette fin, quelques dizaines d'arbres ont été plantés en 1981 sur l'axe des dépôts maximums de la zone Kilo et en zone Frégate, en bordure de la partie touchée par les retombées locales de l'essai Rigel.

Un jeune plant donne des fruits en quantité suffisante pour la mesure des radionucléides à partir de 6 à 7 ans. Ce n'est donc qu'à partir de 1988 que les échantillons, limités en nombre, ont été disponibles. Les activités massiques en ^{137}Cs du coprah et de l'eau de coco, en zone Kilo, étaient les plus élevées des deux atolls. Celles de la zone Frégate étaient proches de celles de la principale cocoteraie de Mururoa (Tableau 21).

Le ^{137}Cs était régulièrement détecté dans le fruit du papayer. De 1979 à 1995, l'activité massique de la pulpe de papaye, à Mururoa, a décru de quelques Bq.kg^{-1} frais à quelques dixièmes de Bq.kg^{-1} frais, avec une période de décroissance effective d'environ 3 ans (Fig. 92).

TABLEAU 21.
Activités massiques maximales en ^{137}Cs d'échantillons d'eau de coco et de coprah issus des fruits des cocotiers plantés en 1980, en zones Kilo et Frégate, à Fangataufa.

Échantillons	Date de prélèvement	Activité maximale	
		Kilo	Frégate
Eau de coco (Bq.l^{-1})	**10.07.88**	**37**	**0,03**
	04.10.90	**22**	
	AIEA 96	**18**	
Coprah (Bq.kg^{-1} frais)	**04.10.90**	**110**	**0,2**
	AIEA 96	**189**	



Fruits du papayer en place sur l'arbre.

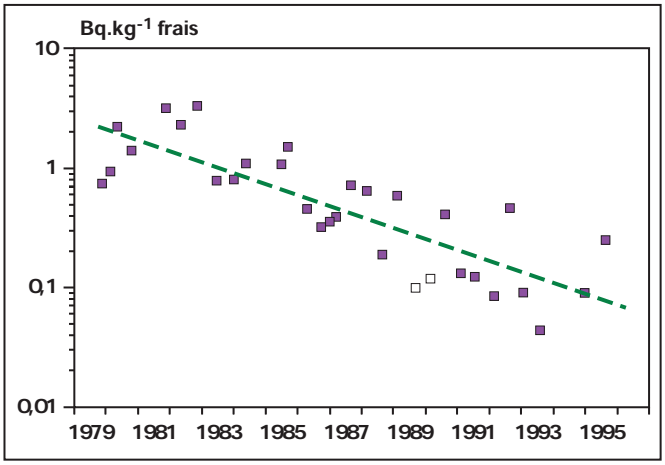


FIG. 92. - Évolution de l'activité massique (Bq.kg^{-1} poids frais) en ^{137}Cs dans des échantillons de pulpe de papaye prélevés, à Mururoa de 1979 à 1995.
La période de décroissance effective T_e a été déterminée à partir de la droite de régression figurée par le trait en pointillés. Les carrés blancs indiquent les résultats de mesures en limite de détection.

L'activité massique du ^{90}Sr des noix de coco de Mururoa a été mesurée à partir de 1970. La moyenne pour l'eau de coco et le coprah s'établissait respectivement à 0,1 Bq.l^{-1} et 0,2 Bq.kg^{-1} frais jusqu'en 1991, date à laquelle l'activité massique est devenue inférieure aux limites de détection des appareils de mesure. Le ^{90}Sr, parfois décelé dans la pulpe de papaye, présentait des niveaux d'activité plus faibles que ceux de la noix de coco, de l'ordre de quelques centièmes ou millièmes de Bq.kg^{-1} frais. La valeur maximale de 0,07 Bq.kg^{-1} frais a été observée en 1979.

À Fangataufa, à la même époque, les échantillons issus de la zone Kilo présentaient des activités massiques en ^{90}Sr de l'ordre de 0,22 Bq.kg^{-1} frais. Le ^{60}Co a également été détecté régulièrement dans les échantillons de coprah, à des niveaux d'activité plus faibles dans l'eau de coco.

IV.3.2 - ISOTOPES DU PLUTONIUM

À Mururoa, les activités massiques les plus élevées en $^{239+240}$Pu ont été mesurées dans des échantillons de feuilles de *Casuarina equisetifolia* prélevés dans le secteur Nord de l'atoll, notamment en zone Colette. Les *maxima* ont été observés lors des travaux d'assainissement de cette zone. Sur dix prélèvements réalisés en 1990, les valeurs en $^{239+240}$Pu étaient comprises entre 3,7 et 32 Bq.kg^{-1} frais, avec une moyenne de 13 Bq.kg^{-1} frais. Les essais de sécurité réalisés dans cette zone ont conduit à des dépôts permettant d'expliquer les niveaux d'activité les plus élevés observés dans les *Casuarina equisetifolia* qui ont poussé par la suite dans cette zone.

Dans les secteurs Est et Ouest de l'atoll de Mururoa, les activités massiques maximales en $^{239+240}$Pu n'ont pas dépassé 1,5 Bq.kg^{-1} frais. L'activité massique du plutonium, dans les échantillons d'eau de coco et de coprah, était trop faible pour être détectée par les techniques de mesure utilisées pour la surveillance de routine.

Aussi, une campagne de prélèvements de grands volumes d'eau de coco (40 litres) a été menée, en 1994, dans les 4 secteurs cardinaux de l'atoll de Mururoa, afin d'atteindre des niveaux d'activité mesurables par concentration du plutonium de l'échantillon. L'activité volumique en $^{239+240}Pu$ variait de $3,3.10^{-5}$ à $5,9.10^{-5}$ Bq.l^{-1}.

L'expertise menée par l'AIEA en 1996 a reporté des activités massiques en $^{239+240}Pu$ comprises entre 0,0177 et 0,030 Bq.kg^{-1} frais, pour les échantillons de végétaux prélevés dans le secteur Ouest, de 0,182 à 0,319 Bq.kg^{-1} frais, pour ceux de la zone Kathie à l'Est et de 0,69 Bq.kg^{-1} frais, pour ceux issus de la zone Denise au Nord de l'atoll.

Les activités massiques en ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$ de la pulpe des échantillons de papaye prélevés à Mururoa étaient mesurées à des niveaux d'activité très faibles. En 1995, les valeurs maximales atteignaient 0,0061 Bq.kg^{-1} frais en ^{238}Pu et 0,032 Bq.kg^{-1} frais en $^{239+240}Pu$.

À Fangataufa, la moitié des 31 échantillons de feuilles de *Scaevola sericea* prélevés entre 1980 et 1995 montrait une activité massique en $^{239+240}Pu$ supérieure aux limites de détection. Les activités maximales atteignaient 0,36 Bq.kg^{-1} frais dans la zone Kilo-Empereur. Des traces de ^{238}Pu étaient également mesurées à hauteur de quelques centièmes de Bq.kg^{-1} frais.

Les activités massiques en $^{239+240}Pu$ mesurées sur les feuilles de *Casuarina equisetifolia* étaient inférieures à celles observées sur *Scaevola sericea*, avec des niveaux compris entre 0,01 et 0,41 Bq.kg^{-1} frais (Fig. 93). Les valeurs fournies en 1996, par l'intercomparaison de l'AIEA, pour la zone Kilo étaient de 0,025 Bq.kg^{-1} frais en $^{239+240}Pu$.

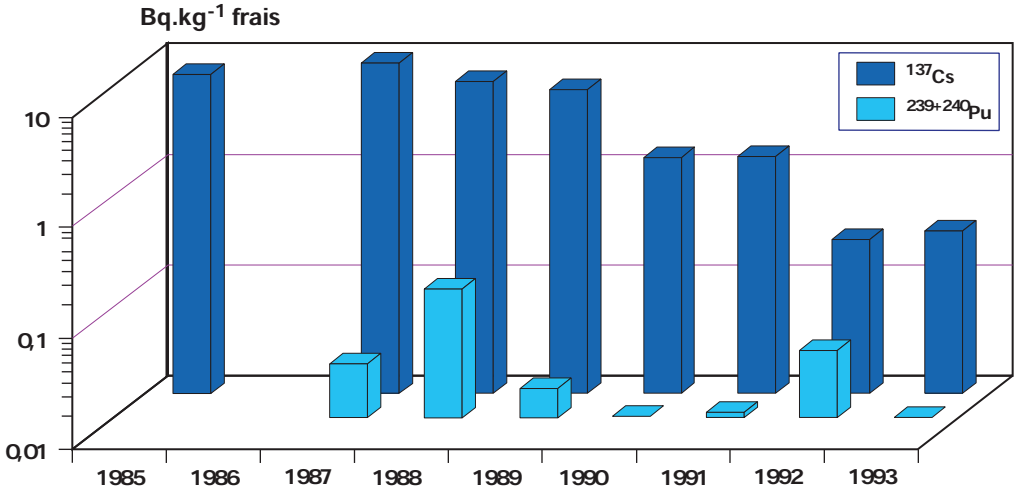


FIG. 93. - Évolution de l'activité massique (Bq.kg^{-1} poids frais) en ^{137}Cs et $^{239+240}Pu$ dans des échantillons de feuilles de *Casuarina equisetifolia* prélevés dans la zone Kilo sur l'atoll de Fangataufa de 1985 à 1993.

Les échantillons de coprah et d'eau de coco issus de la zone Kilo présentaient des niveaux d'activité en plutonium cohérents avec ceux des échantillons collectés en 1996, par l'AIEA, sur cette zone. Pour le coprah, les activités massiques en ^{238}Pu, $^{239+240}Pu$ et ^{241}Am étaient respectivement de 0,016, 0,0487 et 0,0029 Bq.kg^{-1} frais (Tableau 22).

Échantillons	Date de prélèvement	Secteur	Activité massique
Eau de coco	10.07.88	Kilo	0,0014 ± 0,0013 Bq.l^{-1}
Eau de coco	04.10.90	Kilo	0,0017 ± 0,0019 Bq.l^{-1}
Eau de coco	10.02.98	Frégate	≤ 0,00025 Bq.l^{-1}
Eau de coco	03.05.99	Frégate	≤ 0,00038 Bq.l^{-1}
Coprah	04.10.90	Kilo	≤ 0,0037 Bq.kg^{-1} frais
Coprah	AIEA 96	Kilo	0,0487 Bq.kg^{-1} frais
Coprah	10.02.98	Frégate	≤ 0,0017 Bq.kg^{-1} frais
Coprah	03.05.99	Frégate	≤ 0,0011 Bq.kg^{-1} frais

TABLEAU 22.
Activités massiques (Bq.kg^{-1} poids frais ou Bq.l^{-1}) et limites de détection (≤) en $^{239+240}$Pu pour des échantillons d'eau de coco et de coprah issus des fruits des cocotiers plantés, en 1980, sur les zones Kilo et Frégate du secteur Nord de l'atoll de Fangataufa.

IV.3.3 - FACTEURS DE TRANSFERT *IN SITU* SOL-PLANTE

Le rapport entre la valeur de l'activité massique d'un radionucléide présent dans une espèce végétale et son activité massique dans le sol où pousse la plante, permet de quantifier les transferts de ce radionucléide du sol vers la plante (cf. Chapitre II). Les valeurs des facteurs de transfert racinaire s'établissent généralement à partir d'études menées en laboratoire. Lorsqu'elles sont estimées à partir de données de terrain, les valeurs de F_t sont généralement surestimées car elles intègrent les apports dus aux dépôts directs des radionucléides sur la plante et leur absorption foliaire dont l'intensité varie suivant le stade végétatif du végétal. L'estimation de ces facteurs, à partir de données *in situ*, s'avère également délicate en raison des niveaux d'activité massique parfois trop faibles, comme c'est le cas pour le césium dans le sol ou pour le plutonium dans les plantes. Néanmoins, des ordres de grandeur peuvent être avancés à partir des études de terrain menées sur les atolls de Mururoa et Fangataufa.

Les valeurs des facteurs de transfert spécifiques des plantes tropicales *Cocos nucifera*, *Pandanus tectorius* et *Argusia argentea* et des sols de Mururoa, obtenues à partir d'étude réalisées *in situ*, sont cohérentes avec celles publiées pour l'atoll de Bikini où les États-Unis ont réalisé de nombreux essais nucléaires atmosphériques (Tableau 23).

TABLEAU 23.
Facteur de transfert sol-plante (F_t) pour le ^{137}Cs et le $^{239+240}$Pu calculé à partir des résultats d'études expérimentales menées sur les atolls de Mururoa et de Bikini à partir de données américaines.

Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'échantillons utilisés pour calculer les F_t

Échantillons	Facteur de transfert en ^{137}Cs				Facteur de transfert en $^{239+240}$Pu			
	Atoll de Mururoa		Atoll de Bikini		Atoll de Mururoa		Atoll de Bikini	
Eau de coco	2,6	*(3)*	3	*(147)*	≤ 4,2.10^{-5}		0,12.10^{-4}	*(11)*
Coprah	13	*(4)*	10	*(98)*	4,2.10^{-4}		0,97.10^{-4}	*(22)*
Feuille de cocotier	7,1	*(4)*	-		≤ 2,3.10^{-4}		-	
Fruit du *Pandanus*	4,6	*(2)*	7,8	*(11)*	≤ 4,5.10^{-4}		0,43.10^{-4}	*(3)*
Feuille du *Pandanus*	2,9	*(2)*	-		≤ 3,5.10^{-4}		-	
Feuille d'*Argusia*	11	*(2)*	-		≤ 1,6.10^{-3}		-	

IV.4 - EAUX DE MER

Durant la période des essais atmosphériques, en particulier immédiatement après la réalisation d'un essai, les niveaux de l'activité volumique des eaux du lagon permettaient de dresser la cartographie de la radioactivité du lagon à partir de mesures directes du débit de dose. Ces mesures étaient complétées par d'autres analyses, en laboratoire, pour suivre la décroissance de l'activité des eaux. Durant la période des essais souterrains, les niveaux d'activité étant très faibles, les mesures en laboratoire sur les échantillons d'eau prélevés à proximité du point zéro relevaient de la quantification des traces d'activité.

Les résultats obtenus entre 1966 et 1996 permettent de distinguer trois périodes :

- De 1966 à 1974, les activités volumiques des eaux du lagon variaient très rapidement au cours du temps et dans l'espace, en fonction des essais.
- De 1975 à 1984, période de transition entre essais atmosphériques et souterrains, les activités volumiques des radionucléides d'origine artificielle des eaux du lagon ont décru très rapidement au niveau des traces. Ils ont rarement été mesurés dans les eaux océaniques à proximité immédiate des atolls d'expérimentations.
- De 1985 à 1996, la radioactivité artificielle des eaux de mer résultait principalement des radionucléides suivants : tritium sous forme eau tritiée (HTO), ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$. D'autres radionucléides, ^{60}Co, ^{241}Am et ^{241}Pu, étaient présents dans les eaux des lagons, à de très faibles niveaux d'activités volumiques.

Les niveaux atteints par les radionucléides durant ces périodes font l'objet de descriptions détaillées dans les paragraphes suivants ainsi que dans l'annexe 3 pour chacun des essais atmosphériques. Lorsque l'activité était au niveau des traces directement accessibles par des mesures, les niveaux moyens pouvaient être appréciés à l'aide du suivi d'indicateurs biologiques : algues, mollusques, crustacés et poissons, dont les résultats sont fournis dans les paragraphes suivants.

IV.4.1 - INDICE BÊTA GLOBAL

IV.4.1.1 - ESSAIS SUR BARGE

Les trois essais sur barge réalisés à Mururoa, Aldébaran et Sirius, en zone Dindon (1966), et Arcturus, en zone Denise (1967) ainsi que l'essai Rigel (1966) mené à Fangataufa, ont conduit aux valeurs maximales de l'indice bêta global. Lors de ces essais, la boule de feu est entrée en contact avec l'eau et les sédiments du lagon se trouvant à l'aplomb du point zéro, y déposant une quantité significative de produits de fission et d'activation. L'activité volumique des eaux du lagon a décru ensuite linéairement, au cours du temps, suivant une loi du même type que celle décrite pour les produits de fission du nuage radioactif stabilisé, mais avec une constante de décroissance plus rapide (Fig. 94).

L'activité volumique initiale de la masse d'eau au lieu de l'explosion dépendait directement de la quantité de produits de fission injectée dans les eaux du lagon, soit de l'ordre de quelques dizaines de pourcent de l'activité totale de l'ensemble des produits de fission formés lors des essais réalisés sur barge. Ainsi, Sirius, le plus puissant des quatre essais réalisés sur barge, a conduit le 4 octobre 1966 à H+1 au débit de dose maximal de 0,23 $Gy.h^{-1}$, à un mètre au-dessus de la surface du lagon, pour ensuite décroître à 0,02 $Gy.h^{-1}$ à J+1, puis à 0,01 $Gy.h^{-1}$ à J+2 (cf. Annexe 3). La masse d'eau contaminée initialement confinée en zone Dindon, s'est ensuite étendue vers l'est du lagon. L'activité volumique des eaux du lagon devenait pratiquement homogène

à J+37, et atteignait 1,85 à 4,44 MBq.m^{-3}. Le retour en zone de mouillage des bâtiments sur lesquels résidait la totalité du personnel pouvait être autorisé lorsque l'activité volumique de l'eau de mer de la zone portuaire Kathie était redevenue inférieure à 3,7 MBq.m^{-3}.

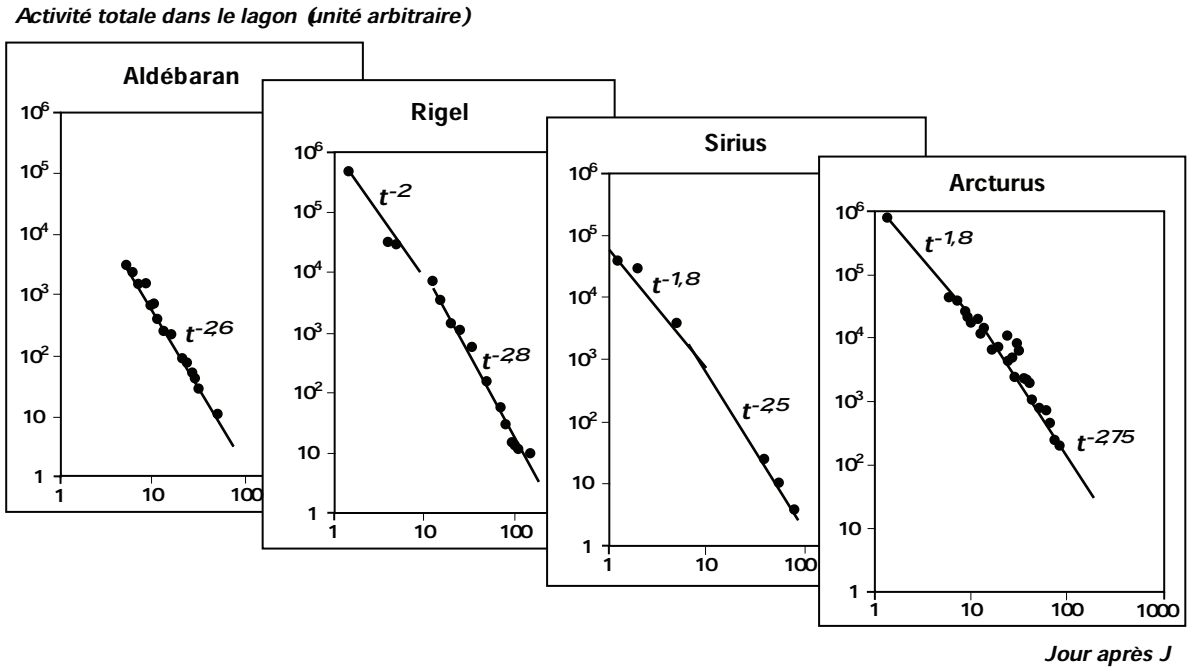


FIG. 94. - Ajustement de lois de décroissance théorique ($A_\beta = A_1.t^x$) de l'activité de l'indice bêta global (A_β) à partir des résultats de mesure au cours du temps des masses d'eau des lagons de Mururoa et Fangataufa contaminées par les essais sur barge de 1966 et 1967.

Cette valeur garantissait le respect de l'activité maximale admissible pour l'eau de boisson (CMA_{eau}) obtenue par désalinisation d'eau du lagon, par les bouilleurs des bateaux (cf. Chapitre III et VI). Ainsi, par exemple, suite à l'essai Sirius, l'autorisation de retour des bateaux dans le lagon de Mururoa n'a été donnée que 47 jours après l'essai. À partir de 1967, un dispositif de pompage dans l'océan a été mis en place pour alimenter en eau les bateaux mouillés en zone Kathie.

IV.4.1.2 - ESSAIS SOUS BALLON

Lors des essais sous ballon, de faible ou moyenne puissance, l'engin devait monter à une altitude suffisante pour que la boule de feu n'atteigne pas la surface du lagon. Néanmoins, lors de certains essais de forte puissance, les capacités d'emport de charge et de transfert de signaux de mesures ne permettaient pas de monter l'engin jusqu'à cette altitude optimale. Il s'agissait alors de positionner l'engin à la hauteur suffisante pour que la réflexion de l'onde de choc sur la surface de l'eau repousse la boule de feu vers le haut dans la phase finale de son expansion, lui donnant une forme aplatie dans sa partie inférieure. L'interaction entre la boule de feu et le lagon était évitée et la radioactivité induite dans le lagon limitée à celle associée aux produits d'activation créés par le rayonnement neutronique à la surface de l'eau, à la verticale du point zéro.

Les résultats du suivi de l'activité volumique de l'eau de mer du lagon de Mururoa, lors d'essais de la campagne 1971, ont mis en évidence la rapidité de la décroissance de la radioactivité induite par ces essais (Fig. 95a). Les résultats, corrigés de la décroissance radioactive, ont permis d'isoler la part de la composante due à la dilution des radionucléides dans la décroissance de l'activité volumique des eaux au droit des zones Denise et Dindon (Fig. 95b). Les tracés de la décroissance de l'activité par dilution mettent en évidence une dilution plus lente dans la zone Dindon, qui est un bassin enclavé, que dans la zone Denise soumise à l'influence des entrées d'eaux océaniques par la passe et à l'action des vents dominants qui y favorisent le renouvellement des eaux.

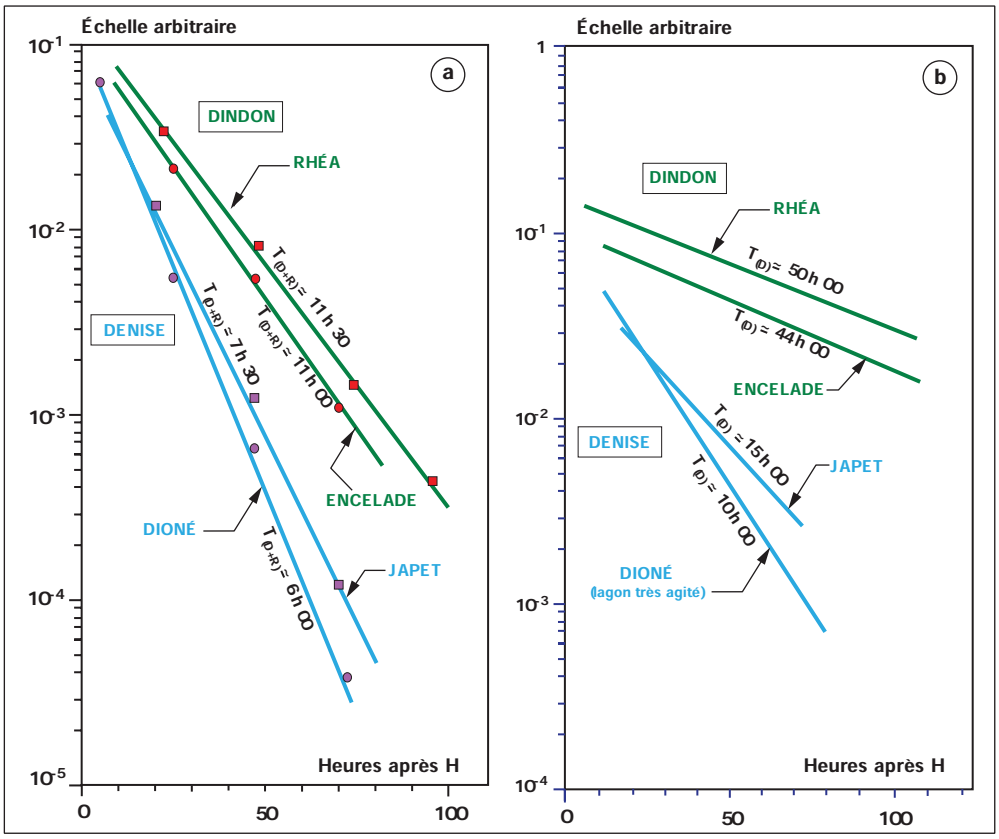
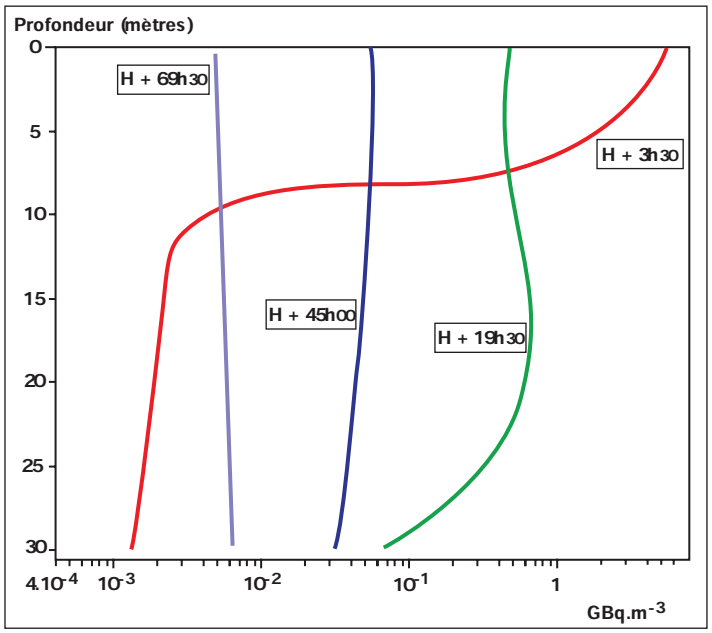


FIG. 95. - *Encart a :* Ajustement des lois de décroissance globale de la radioactivité par dilution et décroissance radioactive (T_{D+R}).

Encart b : Décroissance par dilution (T_D) des masses d'eaux contaminées.

Les ajustements ont été réalisés sur les données de l'évolution au cours du temps de l'indice bêta global des eaux de mer au droit des zones Dindon et Denise, à la suite des essais Dioné (05.06.1971), Encelade (12.06.1971), Japet (04.07.1971) et Rhéa (14.08.1971).

La décroissance radioactive des radionucléides à vie courte, la dilution de l'activité initiale des masses d'eaux du point zéro et le transfert des radionucléides vers les sédiments de fond du lagon conduisaient à une décroissance rapide de l'indice bêta global, à des niveaux homogènes, sur l'ensemble de la colonne d'eau, une vingtaine d'heures après l'essai (Fig. 96).



À partir de 1968, tous les essais ont été réalisés sous ballon et l'activité volumique des eaux du lagon était à un niveau très bas lorsqu'elles atteignaient la zone Kathie. À partir de cette date, il n'existait plus de contrainte radiologique effective pour utiliser l'eau issue des bouilleurs des bateaux qui venaient s'y positionner. À la fin de la campagne de 1970, il a donc été décidé d'arrêter le pompage hors du lagon pour l'alimentation en eau des bâtiments bases.

FIG. 96. - Évolution au cours du temps de l'activité volumique (GBq.m^{-3}) à différentes profondeurs de la colonne d'eau, entre la surface et le fond, aux stations de détection du lagon où l'activité volumique était maximale lors de l'essai Japet (04.07.1971).

Systématiquement après chaque essai, des mesures du débit de dose à la surface des eaux du lagon permettaient d'estimer les niveaux de leur activité volumique et d'en suivre la décroissance au cours du temps. Ces données sont présentées sous forme de cartes dans l'annexe 3 de ce document pour chaun des essais atmosphériques.

IV.4.2 - RADIONUCLÉIDES ÉMETTEURS BÊTA-GAMMA

L'activité volumique des radionucléides émetteurs bêta-gamma présents dans les eaux, tant dans les différents secteurs de lagon qu'au cours du temps, variait de plusieurs ordres de grandeur comme l'indice bêta global entre les périodes d'avant campagne et celles suivant la réalisation d'un essai atmosphérique. Aussi, à partir des valeurs de l'indice bêta global (cf. Annexe 3), les activités volumiques des différents radionucléides, susceptibles d'être présents dans les eaux, pouvaient être rapidement estimées en tenant compte de leur contribution relative à cet indice comme cela va être décrit dans les paragraphes suivants.

IV.4.2.1 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE INFÉRIEURE OU ÉGALE À L'ANNÉE

Essais atmosphériques sur barge

Lors des essais sur barge l'analyse radiochimique d'échantillons d'eau de mer a permis de distinguer les différents radionucléides présents et de comparer leur contribution relative (%) à l'activité volumique totale (Tableau 24).

L'évolution au cours du temps de l'activité volumique des différents radionucléides présents dans un échantillon d'eau du lagon a été suivie en laboratoire par des mesures successives de leur

Radionucléide	Activité volumique	% Activité	Commentaires
^{140}Ba	1 260	36	
^{103}Ru	590	17	
^{131}I	520	15	
^{95}Zr	410	12	
^{89}Sr	120	3,5	^{90}Sr minoritaire
^{136}Cs	9	0,3	^{137}Cs masqué

TABLEAU 24.
Activité volumique (kBq.m^{-3}) des radionucléides présents dans un échantillon d'eau de mer prélevé à J+37, près du point zéro Sirius (04.10.1966).
L'activité totale était de l'ordre de 3 700 kBq.m^{-3}, avec un rapport activité alpha/activité bêta de 6,6.10^{-6}, et un rapport activité insoluble/activité totale de 8 %. L'échantillon d'eaux de mer a fait l'objet d'une filtration sur membrane de 0,22 µm de porosité avant mesure.

activité (Fig. 97). Ces mesures ont permis de vérifier l'enrichissement relatif en produits solubles, ^{140}Ba, ^{131}I, ^{103}Ru, et l'appauvrissement en produits insolubles, ^{95}Zr et ^{141}Ce, sédimentant plus rapidement. Ces derniers se retrouvaient ainsi dans les sédiments du lagon, où s'accumulaient également les produits d'activation des éléments des matériaux constituant la barge : ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{54}Mn et ^{59}Fe.

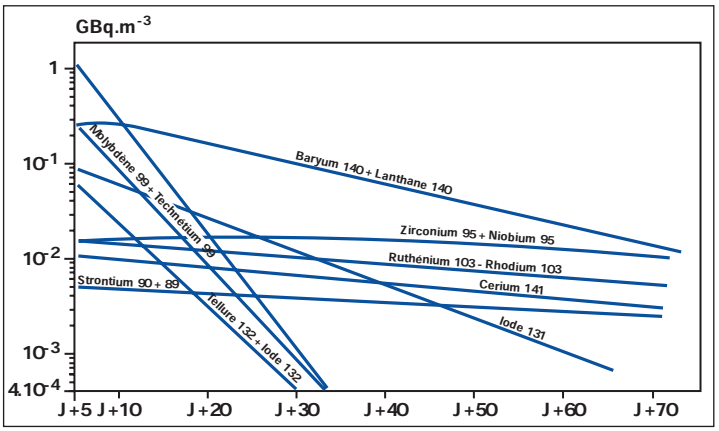


FIG. 97. - Évolution *in vitro* de l'activité volumique (GBq.m^{-3}) des principaux radionucléides présents dans un échantillon d'eau du lagon de Fangataufa, prélevé à J+5, après l'essai Rigel (24.09.1966).

Essais atmosphériques sous ballon

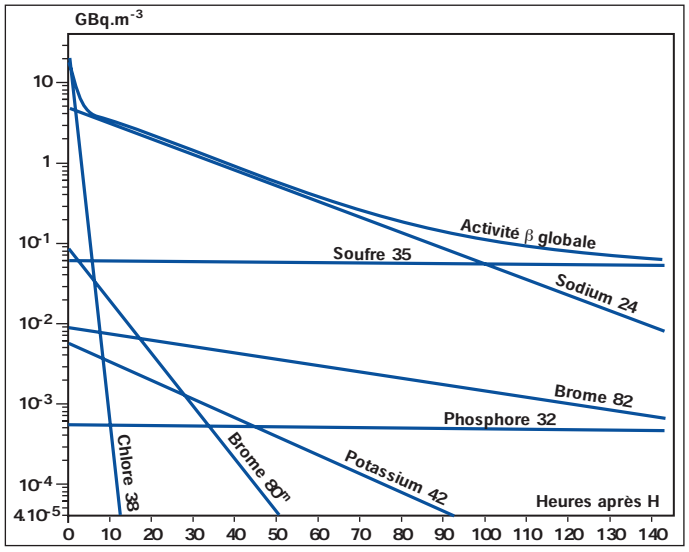
Lors des essais sous ballon, la radioactivité induite dans le lagon provenait essentiellement des produits d'activation créés par le rayonnement neutronique à la surface de l'eau, à l'aplomb du point zéro (Tableau 25). Ces radionucléides sont caractérisés par des périodes relativement courtes, d'une fraction d'heure à quelques dizaines de jours. Le ^{38}Cl était prépondérant pendant la première heure, puis le ^{24}Na l'était jusqu'à 4 jours après l'essai et enfin le ^{35}S.

TABLEAU 25.
Activité volumique (Bq.m^{-3}) des produits d'activation mesurés dans un échantillon d'eau de mer prélevé au point zéro à H+2h15 après l'essai Andromède (15.05.1970).

Radionucléide	Période	Réaction de formation	Activité volumique (Bq.m^{-3})
^{24}Na	15 heures	^{23}Na (n, γ)	7,0.10^{9}
^{32}P	14,3 jours	^{32}S (n, p)	1,5.10^{6}
^{35}S	88 jours	^{34}S (n, γ)	5,6.10^{7}
^{38}Cl	37,3 minutes	^{37}Cl (n, γ)	1,9.10^{10}
^{42}K	12,4 heures	^{41}K (n, γ)	1,9.10^{7}
^{45}Ca	162 jours	^{44}Ca (n, γ)	8,1.10^{5}
^{80m}Br	4,38 heures	^{79}Br (n, γ)	1,4.10^{8}
^{82}Br	35,3 heures	^{81}Br (n, γ)	3,0.10^{7}

Le suivi de l'évolution de l'activité volumique des produits d'activation, en particulier du ^{24}Na et du ^{35}S considérés comme des traceurs des masses d'eau, a permis d'évaluer la vitesse de dilution des radionucléides au sein des eaux du lagon. Ainsi, suite à l'essai Canopus effectué au-dessus du lagon de Fangataufa, le 24 août 1968, l'activité volumique du ^{35}S dans les échantillons d'eau du lagon, ramenée une heure après l'essai, a mis en évidence deux phases :

- jusqu'à 4 jours après l'essai, une homogénéisation des niveaux d'activité volumique du lagon ;
- après 4 jours, une décroissance homogène des niveaux des eaux du lagon, due à leur dilution par les échanges lagon-océan.



Lors de la période des essais atmosphériques, les activités volumiques des eaux du lagon décroissaient donc rapidement au cours du temps, en fonction de la puissance de l'essai, de ses conditions de réalisation et du lieu de l'explosion, dont les caractéristiques hydrologiques conditionnaient par la suite la vitesse de dilution des masses d'eaux contaminées. (Fig. 98).

FIG. 98. - Evolution *in vitro* de l'activité volumique (GBq.m^{-3}) des principaux radionucléides présents dans un échantillon d'eau du lagon de Mururoa prélevé au point zéro 1h30 après l'essai Pollux (03.08.1968).

Essais souterrains

Très rapidement après le dernier essai atmosphérique, les radionucléides de période inférieure à l'année n'ont plus été détectés dans les eaux des lagons. Les apports consécutifs aux essais souterrains étant très faibles, les niveaux dans les eaux et leur évolution spatio-temporelle peut être appréciée par leurs mesures sur les bioindicateurs marins, en particulier le plancton, prélevés dans le cadre de la surveillance radiologique des sites (cf. IV.6.1).

IV.4.2.2 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE SUPÉRIEURE À 5 ANS

Essais atmosphériques

Comme décrit précédemment, l'importance des fluctuations de l'activité volumique avant et après essai a conduit à apprécier les niveaux d'activité moyens des eaux de mer à partir des résultats de la surveillance radiologique d'indicateurs biologiques, algues, mollusques, crustacés, poissons qui accumulent les radionucléides dans certains organes, comme l'hépatopancréas, le foie et les muscles (cf. IV.6).

Essais souterrains

Après l'arrêt des essais atmosphériques, les radionucléides à vie courte n'ont plus été détectés. Pendant la période des essais souterrains, la radioactivité d'origine artificielle des eaux des lagons résultait de la solubilisation lente des radionucléides de période plus longue associés initialement aux sédiments, en particulier à ceux des quatre zones d'essais sur barge et du banc de sable près de la zone Colette.

Au début des années 80, l'activité volumique des eaux du lagon était redescendue à un niveau très bas. Lors des essais souterrains, le confinement des radionucléides dans les formations basaltiques a été vérifié par des techniques de prélèvements et de mesures de plus en plus performantes.

Ainsi, de 1985 à 1996, la radioactivité artificielle des eaux de mer était principalement due aux ^{3}H (sous forme d'eau tritiée, HTO), ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$. D'autres radionucléides, présents en très faibles quantités comme ^{60}Co, ^{241}Am et ^{241}Pu, ont été détectés dans les eaux des lagons et dans l'océan, à proximité immédiate des atolls (Tableau 26).

TABLEAU 26.
Évolution de l'activité volumique ($Bq.m^{-3}$) moyenne en tritium des eaux de surfaces prélevées entre 1987 et 1995.
Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre d'échantillons mesurés.

Année	^{3}H ($Bq.m^{-3}$)		
	Lagon de Mururoa	Lagon de Fangataufa	Abords de Mururoa et Fangataufa
1987	570 ± 200 *(10)*	440 ± 200 *(13)*	200 *(9)*
1988	960 ± 410 *(10)*	-	200 *(14)*
1989	1050 ± 310 *(10)*	-	-
1990	1460 ± 580 *(10)*	-	-
1991	850 ± 450 *(6)*	560 ± 140 *(6)*	-
1993	860 ± 350 *(8)*	610 ± 520 *(5)*	
1994	-	-	176 ± 60 *(7)*
1995	1000 ± 410 *(9)*	470 ± 150 *(5)*	-
1996	-	-	215 ± 200 *(9)*

Année	^{137}Cs ($Bq.m^{-3}$)		
	Lagon de Mururoa	Lagon de Fangataufa	Abords de Mururoa et Fangataufa
1987	3,92 ± 1,12 *(10)*	2,95 ± 0,27 *(18)*	3,23 ± 0,28 *(10)*
1988	3,40 ± 0,55 *(34)*	-	2,58 ± 0,14 *(14)*
1989	2,66 ± 0,26 *(9)*	3,15 ± 0,67 *(6)*	2,81 ± 0,55 *(14)*
1990	2,67 ± 0,16 *(10)*	2,73 ± 0,35 *(6)*	2,59 ± 0,18 *(14)*
1991	2,65 ± 0,36 *(20)*	-	2,21 ± 0,17 *(14)*
1992	-	-	2,20 ± 0,15 *(14)*
1993	2,56 ± 0,15 *(8)*	2,63 ± 0,30 *(5)*	-
1994	-	-	2,05 ± 0,05 *(9)*
1995	2,18 ± 0,09 *(9)*	2,29 ± 0,05 *(15)*	-
1996	-	-	1,99 ± 0,12 *(9)*

Comparée à celle des eaux océaniques avoisinantes, l'activité volumique en tritium des eaux du lagon était plus élevée d'un facteur 5, à Mururoa, et d'un facteur 2, à Fangataufa. Les niveaux observés restaient néanmoins au niveau de traces, de l'ordre du $Bq.l^{-1}$. Les variations observées résultaient des émissions associées aux opérations de post-forages et à la diffusion du tritium à partir de certaines cavités-cheminées dont la partie supérieure atteignait le toit des formations volcaniques.

Césium 137

Pendant les dix dernières années de la période des essais souterrains, l'activité volumique en ^{137}Cs des eaux des lagons de Mururoa et Fangataufa était légèrement supérieure à celle des eaux océaniques environnantes (Tableau 27).

TABLEAU 27.
Évolution de l'activité volumique moyenne ($Bq.m^{-3}$) en ^{137}Cs des eaux de surface prélevées entre 1987 et 1995, dans les lagons de Mururoa et Fangataufa.
Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre d'échantillons mesurés.

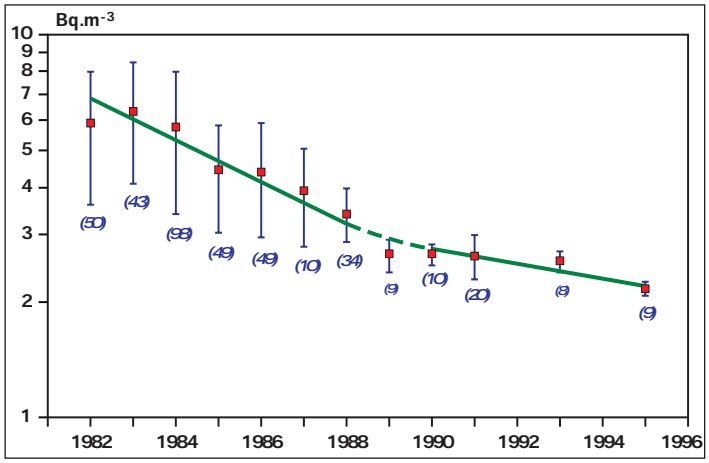


FIG. 99. - Évolution de l'activité volumique moyenne (Bq.m^{-3}) du ^{137}Cs des eaux du lagon de Mururoa, prélevées entre 1982 et 1995. L'amplitude des données est reportée à ± 1σ, autour de la valeur moyenne annuelle. *Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre d'échantillons mesurés.*

Cette différence d'activité provient de la solubilisation progressive du ^{137}Cs, contenu dans le réservoir sédimentaire. Cependant, l'activité volumique en ^{137}Cs des eaux de lagon baisse au cours du temps. De 1982 à 1988, la période de décroissance effective du ^{137}Cs était de l'ordre de 6 ans. À partir du début des années 1990, elle va se rapprocher de celle observée pour les eaux océaniques, de l'ordre de 15 ans (Fig. 99).

Ce changement de pente est vraisemblablement dû à l'appauvrissement en ^{137}Cs des sédiments et à l'homogénéisation des eaux du lagon avec celles de l'océan. Il s'avère plus rapide à Mururoa suite à l'augmentation des échanges lagon-océan résultant du tassement d'une partie du platier, en secteur Sud notamment.

Une diminution progressive, sur plusieurs années, de l'activité volumique du ^{137}Cs des eaux océaniques de surface est également constatée (Fig. 100). La différence entre la période effective, de l'ordre de 15 ans, et la période radioactive de 30 ans s'explique par la dilution progressive des masses d'eau marquées par le ^{137}Cs, par mélange avec des masses d'eaux caractérisées par des niveaux d'activité volumique plus faibles.

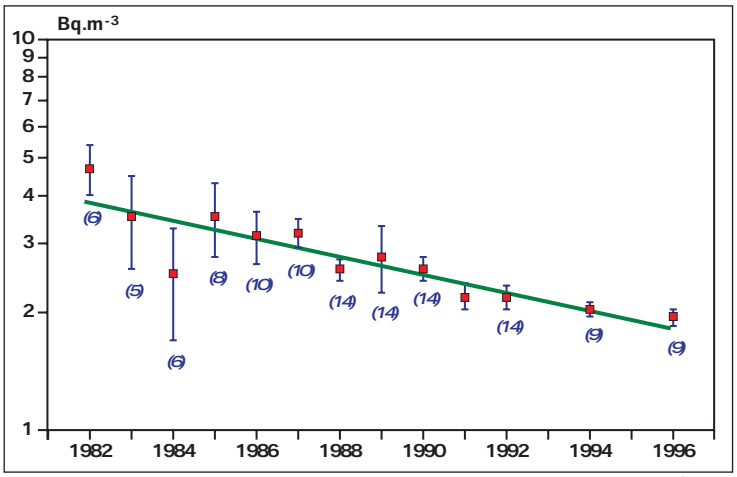


FIG. 100. - Évolution de l'activité volumique moyenne (Bq.m^{-3}) du ^{137}Cs des eaux océaniques prélevées aux abords de l'atoll de Mururoa, entre 1982 et 1996. L'amplitude des données est reportée à ± 1σ autour de la valeur moyenne annuelle.
Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre d'échantillons mesurés.

Les profils de l'activité volumique en ^{137}Cs de la colonne d'eau, de la surface à 2 500 m de profondeur, réalisés en 1993 au large de Mururoa ont mis en évidence une activité volumique homogène dans la couche d'eau de surface, entre 0 et 150 mètres environ, puis une activité volumique décroissante au niveau de la thermocline, jusqu'à environ 800 mètres de profondeur (Fig. 101). L'activité volumique en ^{137}Cs des couches d'eau les plus profondes présentait des niveaux très faibles, inférieurs à 0,1 Bq.m^{-3}.

Les mesures effectuées, de 1987 à 1996, sur les eaux profondes, aux abords immédiats des sites d'expérimentations, montrent une activité volumique stable à partir de 1988 et une décroissance lente pour les eaux de surface (Tableau 28).

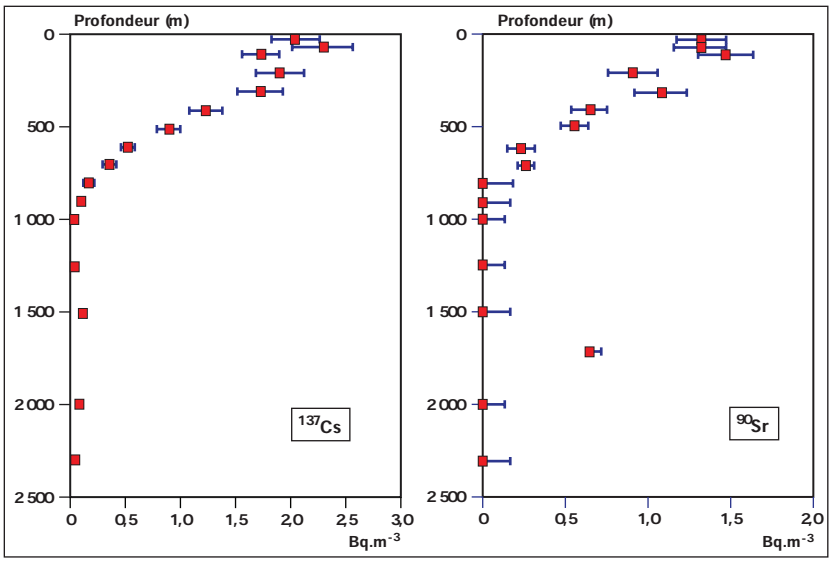


FIG. 101. - Profils verticaux de l'activité volumique moyenne (Bq.m^{-3}) en ^{137}Cs et ^{90}Sr des eaux océaniques prélevées à proximité des atolls de Mururoa et Fangataufa, en 1993. *L'incertitude associée à la mesure est donnée à ± 2σ.*

TABLEAU 28.
Évolution de l'activité volumique moyenne (Bq.m^{-3}) en ^{137}Cs des eaux océaniques prélevées, à différentes profondeurs, aux abords immédiats des atolls de Mururoa et Fangataufa, entre 1987 et 1996.
L'amplitude des données est reportée à ± 1σ autour de la valeur moyenne annuelle.
Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre d'échantillons mesurés.

Année	^{137}Cs (Bq.m^{-3})									
	- 10 mètres		- 200 mètres		- 300 mètres		- 400 mètres		- 600 mètres	
1987	3,23 ± 0,28	(10)	2,63 ± 0,55	(3)	-		2,11 ± 0,55	(7)	0,85 ± 0,13	(4)
1988	2,58 ± 0,14	(14)	2,41 ± 0,16	(8)	-		1,51 ± 0,16	(11)	0,50 ± 0,20	(11)
1989	2,81 ± 0,55	(14)	2,68 ± 0,63	(8)	-		1,68 ± 0,63	(10)	0,66 ± 0,23	(10)
1990	2,59 ± 0,18	(14)	2,41 ± 0,12	(8)	-		1,46 ± 0,12	(11)	0,52 ± 0,23	(11)
1991	2,21 ± 0,17	(14)	2,24	(1)	-		1,54 ± 0,12	(11)	0,59 ± 0,08	(11)
1992	2,20 ± 0,15	(14)	2,06 ± 0,18	(8)	-		1,36 ± 0,18	(11)	0,50 ± 0,14	(11)
1994	2,05 ± 0,05	(9)	-		1,72 ± 0,10	(9)	-		0,51 ± 0,08	(9)
1996	1,99 ± 0,12	(9)	-		1,76 ± 0,08	(9)	-		0,56 ± 0,06	(9)

Strontium 90

À partir de 1989, l'activité volumique en ^{90}Sr des eaux des lagons de Mururoa et de Fangataufa était proche de 1,5 Bq.m^{-3}, du même ordre de grandeur que celle des eaux océaniques de surface (Tableau 29). Aucune variation importante n'a été distinguée, au cours du temps ou géographiquement, entre les stations de prélèvements.

Année	^{90}Sr (Bq.m^{-3})					
	Lagon de Mururoa		Lagon de Fangataufa		Abords de Mururoa et Fangataufa	
1989	1,66 ± 0,08	(9)	-		1,61 ± 0,11	(3)
1990	1,87 ± 0,20	(10)	-		1,61 ± 0,15	(2)
1991	1,48 ± 0,25	(10)	1,50 ± 0,06	(6)	1,28 ± 0,16	(5)
1992	-		-		1,48 ± 0,12	(14)
1993	1,56 ± 0,16	(8)	1,74 ± 0,35	(5)	-	
1994	-		-		1,24 ± 0,11	(9)
1995	1,50 ± 0,15	(9)	1,51 ± 0,09	(5)	-	
1996	-		-		1,12 ± 0,06	(9)

TABLEAU 29.
Évolution de l'activité volumique moyenne (Bq.m^{-3}) en ^{90}Sr des eaux de surface prélevées, entre 1989 et 1996. L'amplitude des données est reportée à ± 1σ autour de la valeur moyenne annuelle. *Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre d'échantillons mesurés.*

En 1993, au large de Mururoa, les profils verticaux de l'activité volumique en ^{90}Sr ont mis en évidence la présence d'une couche de mélange homogène en surface atteignant 150 mètres de profondeur. L'activité volumique diminuait ensuite rapidement avec la profondeur pour atteindre une activité inférieure à 0,3 Bq.m^{-3} à partir de 600 mètres (Fig. 101).

L'évolution au cours du temps, de 1991 à 1994, de l'activité volumique des eaux profondes mesurées aux abords immédiats des deux atolls d'expérimentations était proche de celle des échantillons prélevés à la limite des eaux territoriales en 1993 (Tableau 30). Pendant la même période, le rapport ^{137}Cs/^{90}Sr des eaux océaniques, quelle que soit la profondeur, est resté constant au cours du temps, fluctuant entre 1,7 et 1,9.

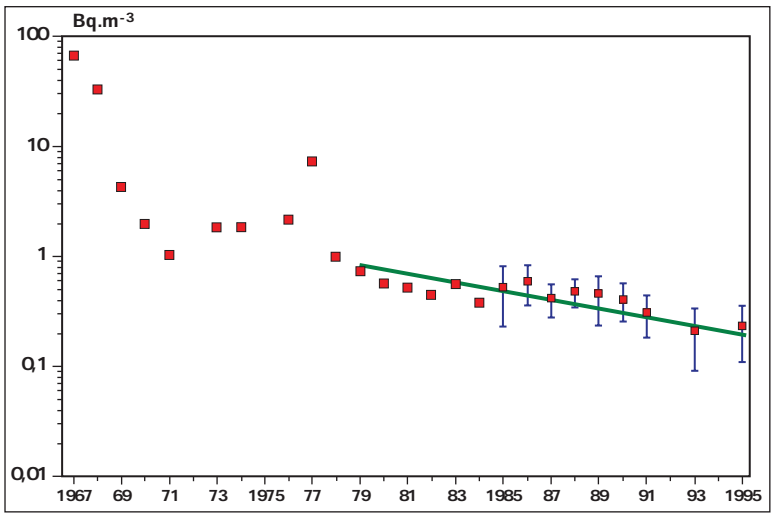
TABLEAU 30.
Évolution de l'activité volumique moyenne (Bq.m^{-3}) en ^{90}Sr des eaux océaniques prélevées à différentes profondeurs aux abords immédiats de Mururoa et Fangataufa, entre 1991 et 1994. L'amplitude des données est reportée à ± 1σ autour de la valeur moyenne annuelle.
Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre d'échantillons mesurés.

Année	^{90}Sr (Bq.m^{-3})									
	- 10 mètres		- 200 mètres		- 300 mètres		- 400 mètres		- 600 mètres	
1991	1,28 ± 0,16	(5)	1,14	(1)	-		0,80	(1)	0,39	(1)
1992	1,48 ± 0,12	(14)	1,41 ± 0,12	(8)	-		0,98 ± 0,18	(10)	0,48 ± 0,18	(10)
1993	1,24 ± 0,11	(9)	-		1,07 ± 0,10	(9)	-		0,31 ± 0,06	(9)
1994	1,12 ± 0,06	(9)	-		1,00 ± 0,08	(9)	-		0,31 ± 0,06	(9)

IV.4.3 - ISOTOPES DU PLUTONIUM

IV.4.3.1 - ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES

Les niveaux d'activité les plus élevés en plutonium dans les eaux des lagons ont été observés au cours des premières années qui suivirent les essais sur barge. Par la suite, la fraction du plutonium associée aux particules en suspension s'est déposée sur l'ensemble du fond des lagons, diminuant fortement son activité dans les eaux.



Sur l'ensemble de la période des essais atmosphériques, l'activité volumique moyenne en plutonium du lagon a décru après le dernier essai sur barge, passant de 70 $Bq.m^{-3}$ en 1967, à environ 2 $Bq.m^{-3}$ en 1974, après le dernier essai sous ballon (Fig. 102).

FIG. 102. - Évolution de l'activité volumique moyenne ($Bq.m^{-3}$) en $^{239+240}Pu$ des eaux filtrées du lagon de Mururoa prélevées en surface, entre 1967 et 1995. L'amplitude des données est reportée à $\pm 1\sigma$ autour de la valeur moyenne annuelle à partir de 1985.

IV.4.3.2 - ESSAIS SOUTERRAINS

Les fluctuations de l'activité volumique en $^{239+240}Pu$ des eaux du lagon observées pendant la période des essais souterrains provenaient de la remise en suspension des sédiments marqués en plutonium par les ondes de choc générées par les explosions. Elles résultaient également, mais dans une moindre mesure, de l'action des dépressions météorologiques les plus fortes et des tempêtes cycloniques. Depuis une vingtaine d'années, l'activité volumique en $^{239+240}Pu$ des eaux du lagon de Mururoa diminue régulièrement, avec une période de décroissance effective estimée à environ 7 ans. À Mururoa, l'activité volumique en $^{239+240}Pu$ des eaux du lagon augmentait de l'ouest vers le nord-est de l'atoll (Fig. 103).

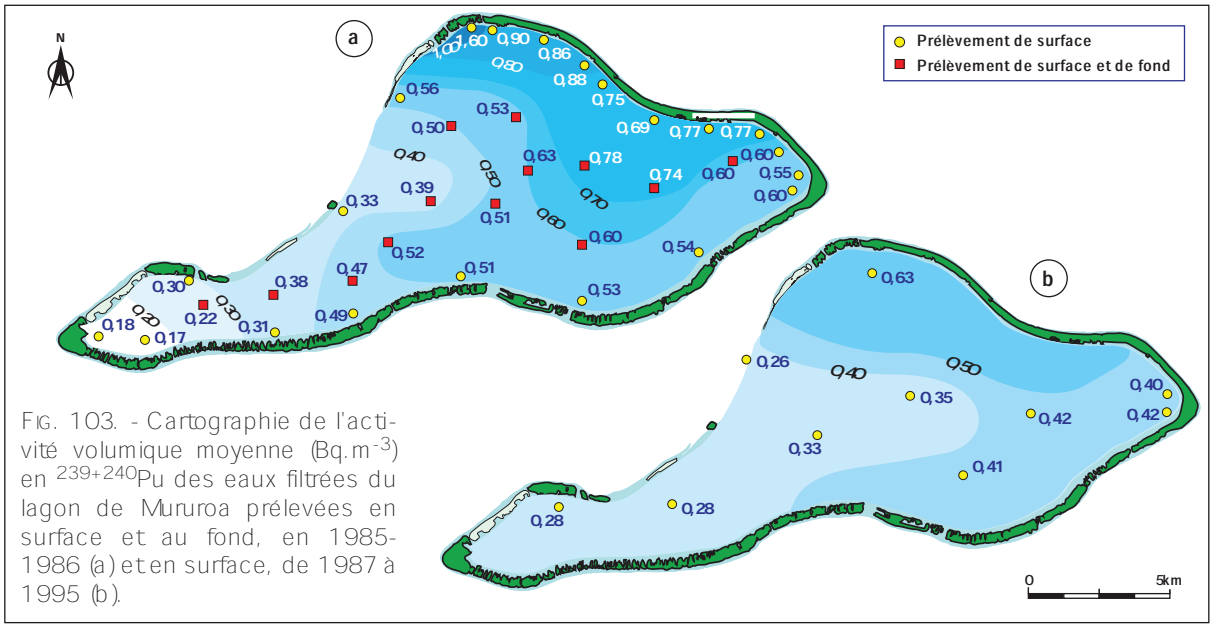


FIG. 103. - Cartographie de l'activité volumique moyenne ($Bq.m^{-3}$) en $^{239+240}Pu$ des eaux filtrées du lagon de Mururoa prélevées en surface et au fond, en 1985-1986 (a) et en surface, de 1987 à 1995 (b).

L'activité maximale, de l'ordre de 1,6 $Bq.m^{-3}$ a été mesurée en 1985 - 1986, au niveau du banc Colette, où l'activité massique en $^{239+240}Pu$ des sédiments était également la plus élevée du lagon (10^6 $Bq.kg^{-1}$ sec). Les activités les plus faibles ont paradoxalement été observées dans le secteur Ouest de l'atoll où ont eu lieu deux essais sur barge ayant affecté les fonds du lagon. Ce gradient s'explique par l'entrée d'eaux océaniques par les *hoa* du platier du secteur Sud et entre les *motu* des zones Dindon et Faucon. Ces eaux caractérisées par des activités faibles diluaient de manière significative l'activité initiale des eaux du secteur Ouest du lagon.

À Fangataufa, le niveau de l'activité volumique en $^{239+240}Pu$ des eaux du lagon augmentait du nord-ouest vers le sud-est de l'atoll (Fig. 104). Les activités les plus faibles, observées en secteur Nord-Ouest, étaient dues à la dilution résultant des entrées d'eaux océaniques par les nombreux *hoa* des zones Pavillon et Hôtel et par la passe. Par ailleurs, les valeurs d'activité volumique légèrement plus élevées qu'à Mururoa s'expliquent par la solubilisation des radionucléides à partir de sédiments d'activités massiques plus élevées et par un taux de renouvellement des eaux plus faible.

L'évolution spatiale de l'activité volumique du ^{238}Pu des eaux des lagons de Mururoa et de Fangataufa était très proche de celle du $^{239+240}Pu$. Le rapport $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ était relativement stable, environ 0,2 à Mururoa et 0,4 à Fangataufa, identiques à celui mesuré sur les sédiments des deux atolls. Ce rapport pouvait être localement plus élevé, supérieur à 0,5, comme en secteur Ouest de Mururoa, suite à l'un des deux essais sur barge, ou plus faible, proche de 0,01, comme en secteur Nord de Mururoa, suite aux essais de sécurité.

Le rapport des activités $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ associé aux matières en suspension était sensiblement le même que celui observé dans la fraction dissoute et n'évoluait pas d'une année à l'autre. En effet, le plutonium accumulé dans les sédiments des lagons pouvait ensuite être remobilisé sous l'effet des échanges sédiments-eau. Ce processus a conduit à une augmentation de l'activité volumique de la couche d'eau en contact avec le fond par rapport à celle des eaux de surface (Fig. 105).

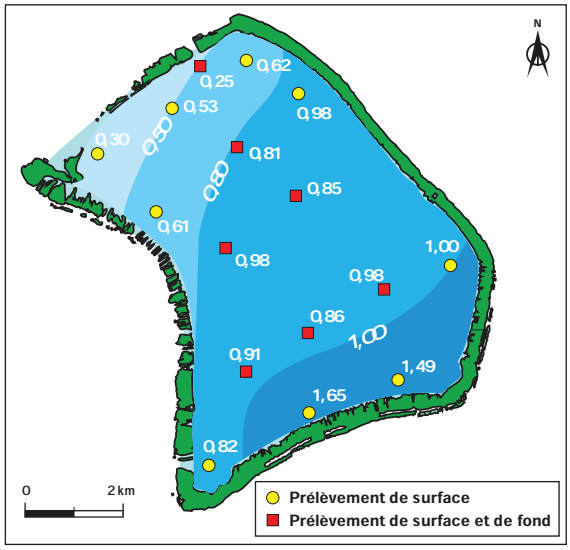


FIG. 104. - Cartographie de l'activité volumique moyenne ($Bq.m^{-3}$) en $^{239+240}Pu$ des eaux filtrées du lagon de Fangataufa prélevées en surface et au fond, en 1987.

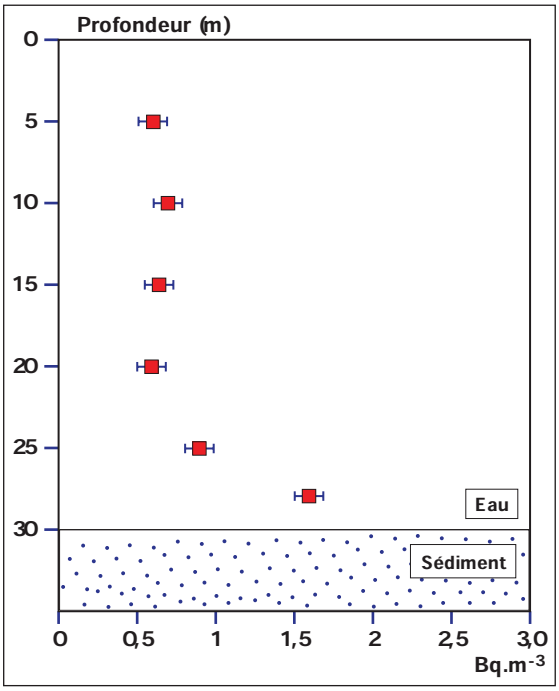


FIG. 105. - Profil vertical de l'activité volumique moyenne ($Bq.m^{-3}$) en $^{239+240}Pu$ des eaux filtrées du lagon de Mururoa prélevées, en 1984, à différentes profondeurs de la colonne d'eau au niveau du point zéro de l'essai Sirius.

Dans les eaux de lagon, le plutonium se présentait sous deux formes : l'une soluble, non retenue lors de la filtration des eaux de mer sur une membrane de 0,45 µm de porosité, l'autre particulaire, associée à la matière en suspension retenue sur la membrane filtrante. L'activité en $^{239+240}$Pu de la fraction particulaire variait fortement suivant le lieu et la date de prélèvement. Ces variations étaient liées à celles du taux de remise en suspension des sédiments, elles-mêmes fonction de l'état d'agitation des eaux du lagon lors des campagnes de prélèvement.

Ainsi, en 1995 par exemple, l'activité de la fraction particulaire à Mururoa était de l'ordre de 2 à 6 % de l'activité de la fraction soluble ; alors que pour les années précédentes elle était de l'ordre de 10 à 30 %, voire exceptionnellement de 50 % (Fig. 106). Les activités volumiques les plus élevées étaient toujours observées en secteur Nord, à proximité des sites des essais de sécurité.

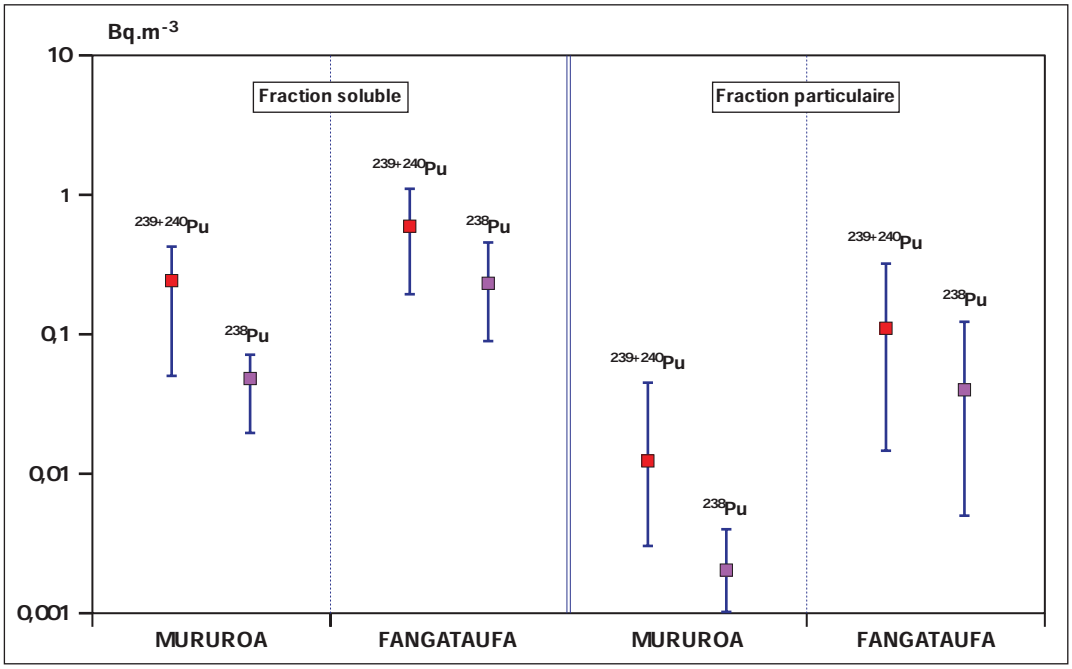


FIG. 106. - Activité volumique minimale, moyenne et maximale (Bq.m^{-3}) en ^{238}Pu et $^{239+240}$Pu de la fraction soluble et de la fraction particulaire des eaux prélevées, en 1995, dans les lagons de Mururoa et de Fangataufa.

À Mururoa, entre 1985 et 1996, à l'exception des eaux à l'interface avec les sédiments dans les zones d'essais sur barge, l'activité en $^{239+240}$Pu liée à la fraction particulaire représentait, en moyenne, de l'ordre de 17% de l'activité totale donc une proportion plus élevée que celle observée dans les eaux océaniques qui était inférieure à 1%.

Contrairement à celles du ^{90}Sr et du ^{137}Cs, l'activité volumique du plutonium des eaux océaniques de surface était comprise entre 1 et 2 mBq.m^{-3}, soit 200 à 500 fois plus faible que celle des eaux des lagons. Les échanges lagon-océan s'effectuant principalement au niveau des passes influençaient significativement les niveaux d'activité volumique du plutonium au voisinage des atolls, jusqu'à la limite des eaux territoriales où les activités volumiques du plutonium pouvaient être supérieures à celles des eaux océaniques polynésiennes. Les résultats en $^{239+240}$Pu observés entre 1989 et 1996 montrent qu'en raison des échanges d'eaux continus, entre l'océan et les lagons des atolls d'expérimentations, l'activité en $^{239+240}$Pu des eaux en surface au niveau des

passes est 10 à 20 fois supérieure à celle des eaux se trouvant à proximité des deux atolls (Fig. 107). L'amplitude des variations était certainement due aux différences de mélange des eaux des lagons de Mururoa et Fangataufa avec les eaux du large en fonction de l'intensité des courants au moment des prélèvements.

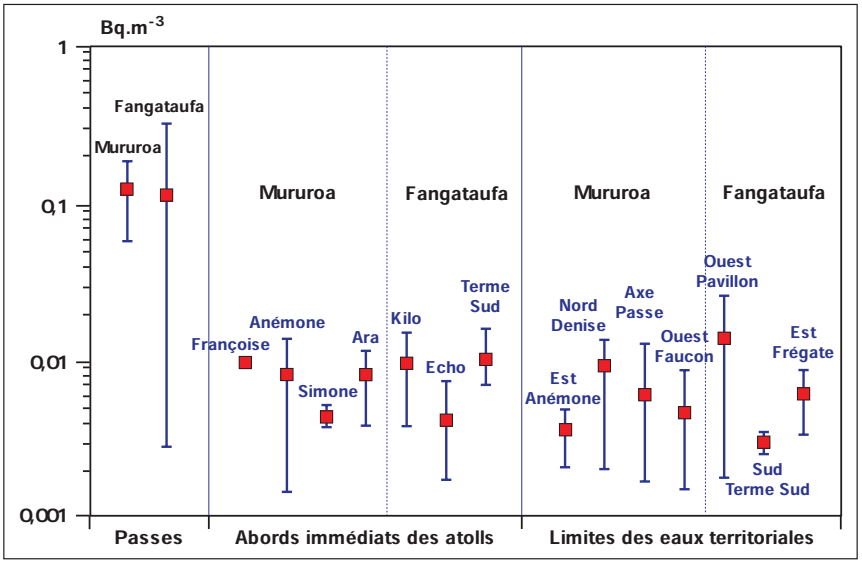


FIG. 107. - Activité volumique minimale, moyenne et maximale (mBq.m^{-3}) en $^{239+240}$Pu des eaux de surface prélevées, entre 1989 et 1996, dans les passes, aux abords immédiats et à la limite des eaux territoriales des atolls d'expérimentations de Mururoa et Fangataufa.

Des profils verticaux en $^{239+240}$Pu en fonction de la profondeur ont été réalisés, en 1993, au large de Mururoa (Fig. 108). L'activité volumique était constante dans la couche de surface, augmentait pour atteindre un maximum aux environs de 600 mètres de profondeur et diminuait ensuite assez rapidement jusqu'à 1 000 mètres puis, plus lentement, au-delà. Ce type de profils, présentant un maximum d'activité entre 500 et 1 000 mètres de profondeur, a été observé dans les océans du monde entier.

Les activités volumiques en ^{238}Pu sont rarement détectables, excepté au voisinage des passes, où le rapport d'activité ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu était identique à celui des eaux des lagons.

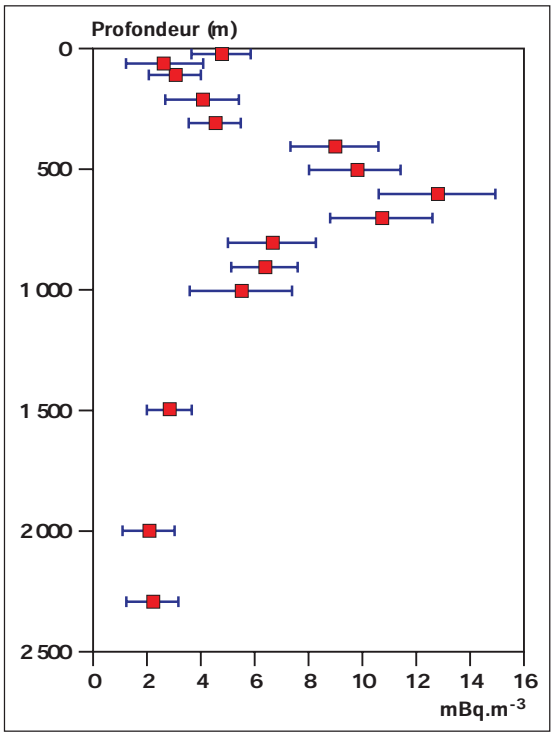


FIG. 108. - Profils de l'activité volumique (mBq.m^{-3}) en $^{239+240}$Pu des eaux prélevées en 1993, entre la surface et 2 500 m de profondeur, à proximité des atolls de Mururoa et Fangataufa.

IV.5 - SÉDIMENTS MARINS

Sur les sites d'expérimentations, la radioactivité mesurée dans les sédiments des lagons provenait essentiellement des retombées de quatre essais sur barge : Aldébaran et Sirius au droit du point Dindon, Arcturus au droit du point Denise à Mururoa et Rigel au droit du point Frégate à Fangataufa. À Mururoa les différents essais de sécurité réalisées sur les *motu* du secteur Nord ont également conduit à des dépôts significatifs de plutonium. Les dépressions tropicales de 1981 entraînèrent l'arrachage du bitume qui avait été utilisé sur la dalle de la zone Colette pour y fixer les particules de plutonium dont l'essentiel se situe aujourd'hui encore dans le banc de sable immergé au droit de la zone Colette (Fig. 109).

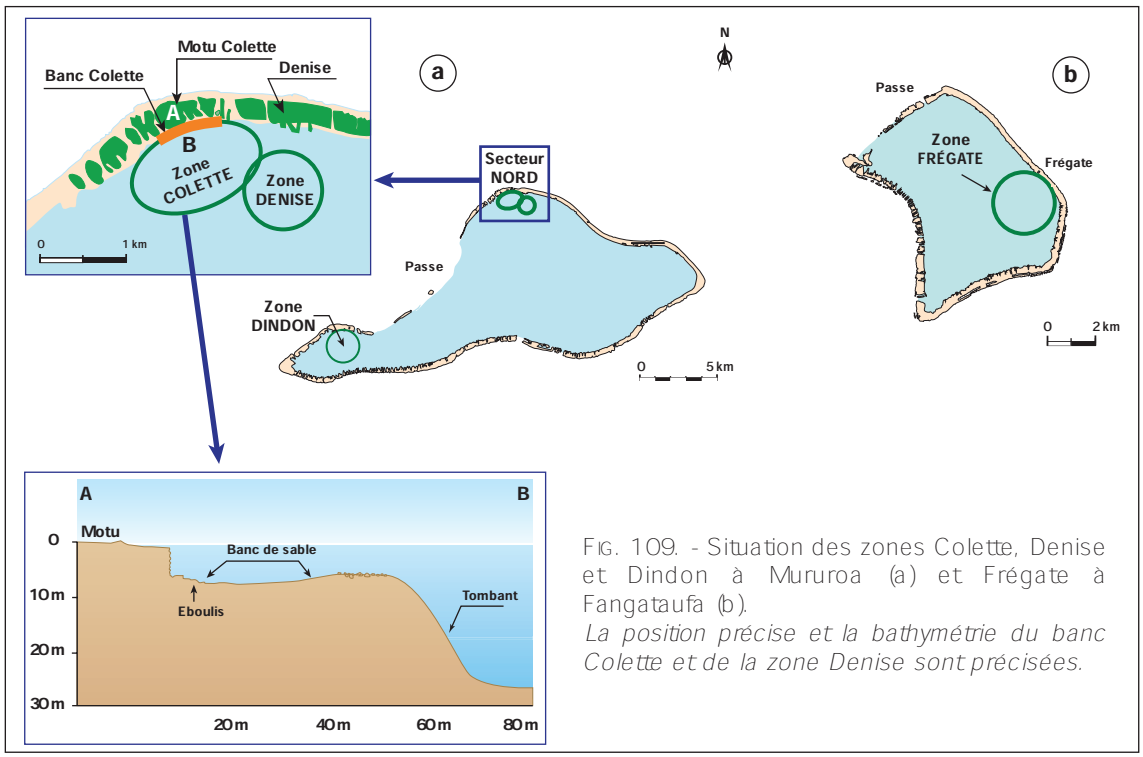


FIG. 109. - Situation des zones Colette, Denise et Dindon à Mururoa (a) et Frégate à Fangataufa (b).
La position précise et la bathymétrie du banc Colette et de la zone Denise sont précisées.

Lors des essais sur barge, les dépôts de radionucléides au point zéro se sont produits essentiellement par sédimentation des produits insolubles. L'enrichissement des sédiments a concerné le ^{141}Ce et ^{95}Zr et les produits d'activation ^{57}Co, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{54}Mn et ^{59}Fe.

À Mururoa, au droit du point Dindon par exemple, l'activité associée à l'ensemble des radionucléides émetteurs bêta-gamma, à la verticale du point zéro de l'essai Sirius, a atteint $3,7.10^{7}$ à $3,7.10^{8}$ Bq.g^{-1} en 1966, entre 30 et 100 jours après l'essai. À cette date, des débits de dose voisins de 0,1 gray.h^{-1} ont été mesurés au contact des sédiments.

Un inventaire exhaustif de l'activité des radionucléides présents dans les sédiments des lagons des deux atolls a été réalisé à partir des résultats de campagnes de prélèvements effectuées entre 1984 et 1990 :

- en secteur Ouest (Dindon), 240 prélèvements de sédiments de surface ont été réalisés, sur une surface de 3 km^2. Ils ont été complétés par une douzaine de carottages, certains atteignant 5 mètres de profondeur, afin de décrire le profil vertical de l'activité massique de ces sédiments ;
- sur le secteur Nord (zone Denise et banc Colette), 450 prélèvements de sédiments superficiels ont été réalisés sur une surface de 4 km^2, dont 200 sur le banc Colette (6 000 m^2). Ils ont été complétés par des carottages de sédiments de 0,5 à 1 m de profondeur, en 9 emplacements et par quelques carottages peu profonds d'environ 50 cm au droit du point Denise ;
- dans le reste du lagon, 440 prélèvements de sédiments de surface répartis selon un quadrillage de maille de 500 m de côté ont été réalisés. Ils ont été complétés par une trentaine de carottages permettant d'étudier la distribution verticale de la radioactivité contenue dans ces sédiments.

Un bilan radiologique complet de la radioactivité des sédiments de l'atoll de Fangataufa a été effectué en 1987, en s'appuyant sur :

- 133 prélèvements de sédiments de surface, dont 85 dans la zone de l'expérimentation sur barge Rigel,
- 14 carottages jusqu'à 55 centimètres de profondeur, dont 6 dans la zone Frégate.

IV.5.1 - RADIONUCLÉIDES ÉMETTEURS BÊTA-GAMMA

Classés par activités massiques décroissantes, les radionucléides émetteurs gamma associés aux sédiments, sont : ^{155}Eu, ^{241}Am, ^{60}Co, ^{137}Cs et ^{125}Sb.

Les activités massiques maximales en ^{241}Am ont été relevées au niveau des points zéro des essais sur barge des deux atolls et du banc Colette, à Mururoa (Fig. 110).

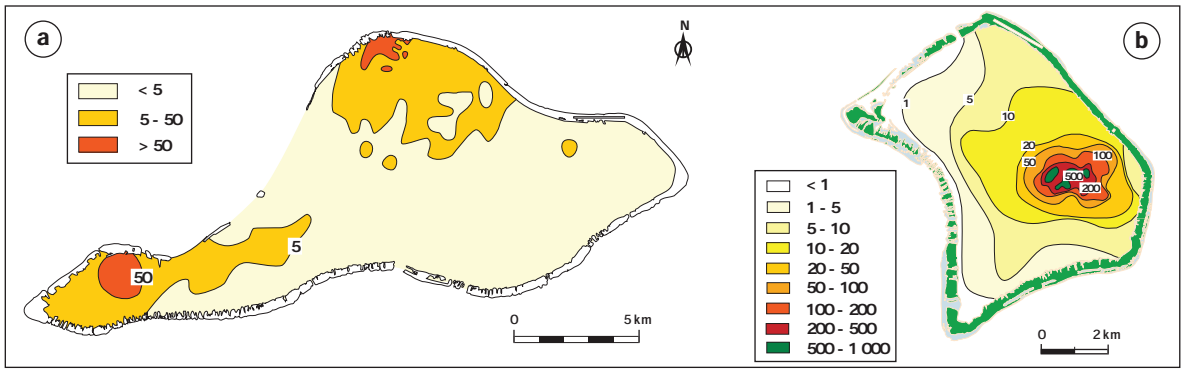


FIG. 110. - Activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en ^{241}Am des sédiments de surface des lagons de Mururoa (a) et de Fangataufa (b).

À Mururoa, les activités massiques atteignaient 68 000, 1 600 et 90 Bq.kg^{-1} sec respectivement sur le banc Colette et au droit des points Dindon et Denise (Fig. 111). Dans les autres zones du lagon, l'activité en ^{241}Am restait inférieure à 5 Bq.kg^{-1} sec (Fig. 110a).

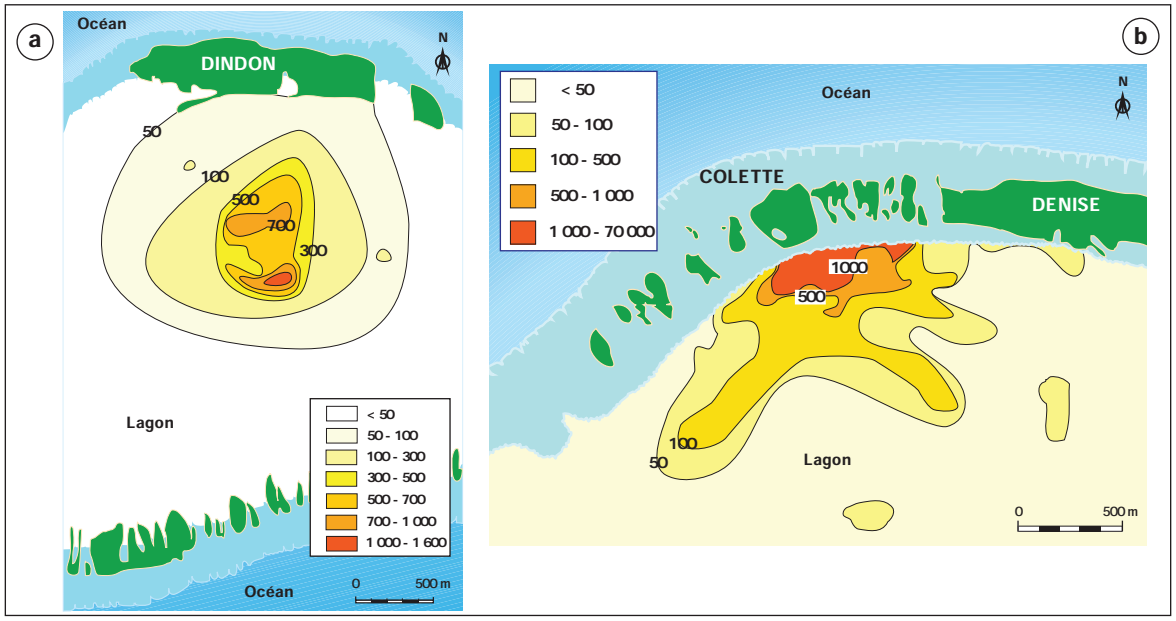


FIG. 111. - Cartographie de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en ^{241}Am des sédiments de surface prélevés au droit du point Dindon (a) et sur le banc Colette (b), dans le lagon de Mururoa.

Le ^{155}Eu était le radionucléide émetteur gamma le plus abondant dans les sédiments avec des valeurs d'activité massique maximales de l'ordre de 7 000 Bq.kg^{-1} sec, au droit des points Dindon et Denise, à Mururoa et de 5 000 Bq.kg^{-1} sec au droit du point Frégate, à Fangataufa, en 1987 (Fig. 112). Les autres parties des lagons présentaient des activités massiques inférieures à 50 Bq.kg^{-1}sec.

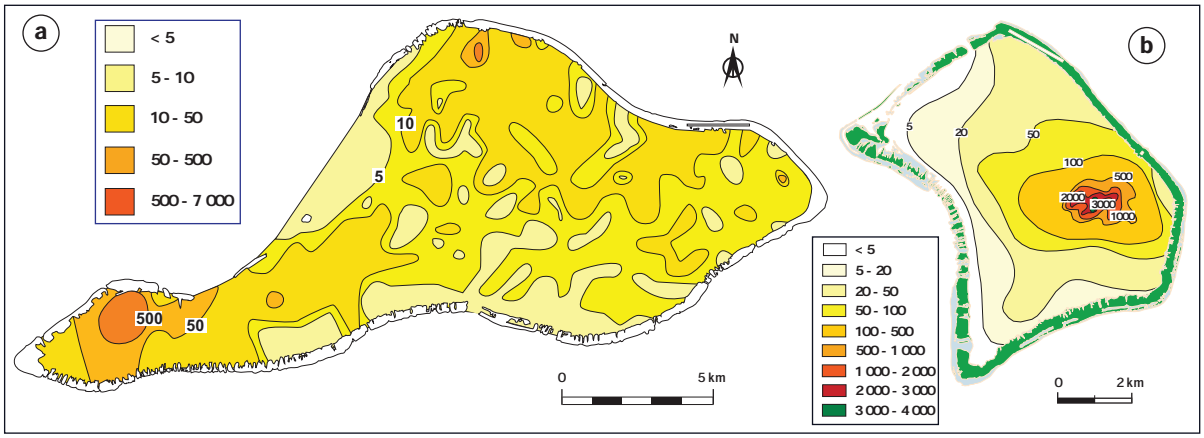


FIG. 112. - Cartographie de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en ^{155}Eu des sédiments de surface des lagons de Mururoa (a), prélevés en 1988, et de Fangataufa (b) échantillonnés en 1987.

L'activité massique en ^{60}Co était inférieure à 5 Bq.kg^{-1} sec. ^{125}Sb et ^{137}Cs étaient difficilement décelables à l'exception des sédiments des zones au droit des points Dindon et Denise où le ^{137}Cs atteignait des activités supérieures à 20 Bq.kg^{-1} sec (Tableau 31 et Fig. 113). L'évolution théorique au cours du temps des niveaux d'activité massique des radionucléides a été estimée, à partir de ces valeurs maximales d'activité massique, en tenant compte de la décroissance due à leur période radioactive. Ainsi, au droit du point Dindon, les activités massiques estimées pour l'année 2006 ne pouvaient dépasser 0,8, 80, 600 et 1 600 Bq.kg^{-1} sec en ^{125}Sb, ^{60}Co, ^{155}Eu et ^{137}Sb , respectivement.

Le ^{137}Cs et ^{125}Sb n'étaient mesurables qu'à proximité du point zéro des essais sur barge. Leur répartition géographique dans les sédiments était similaire à celle de l'américium et de l'europium. Ces radionucléides étaient absents du banc Colette car les essais de sécurité n'ont pas conduit à la formation de produits de fission.

TABLEAU 31.
Activité massique maximale (Bq.kg^{-1} sec) des principaux émetteurs gamma des échantillons de sédiments de surface prélevés dans les zones Dindon le 01.04.1984, Denise le 01.10.1986, à Mururoa, et Frégate le 01.09.1987, à Fangataufa.

Radionucléide	Activité maximale en Bq.kg^{-1} sec		
	Zone Dindon	Zone Denise	Zone Frégate
^{60}Co	1 350	100	2 400
^{125}Sb	220	20	160
^{137}Cs	2 600	18	680
^{155}Eu	12 500	1 950	5 200
^{241}Am	1 600	90	1 300

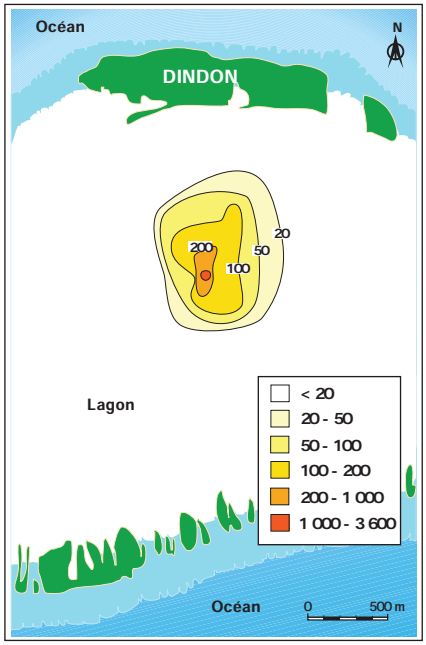


FIG. 113. - Activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en ^{137}Cs des sédiments de surface de la zone Dindon de l'atoll de Mururoa, au 01.04.1984.

Le ^{90}Sr n'a pas été mesuré systématiquement sur tous les échantillons, son activité massique dans les sédiments de surface était du même ordre de grandeur que celle du ^{137}Cs.

IV.5.2 - ISOTOPES DU PLUTONIUM

L'activité massique en $^{239+240}Pu$ des sédiments de surface de Mururoa a atteint des valeurs de 20 000 Bq.kg^{-1} sec, au droit du point Dindon et de 6 500 Bq.kg^{-1} sec au droit du point Denise, avec un maximum de $2,5.10^{6}$ Bq.kg^{-1} sec au niveau du banc Colette (Fig. 114a). L'activité massique restait supérieure à 1 000 Bq.kg^{-1} sec à plus d'un kilomètre à la périphérie des points ayant les niveaux les plus élevés (Fig. 114b).

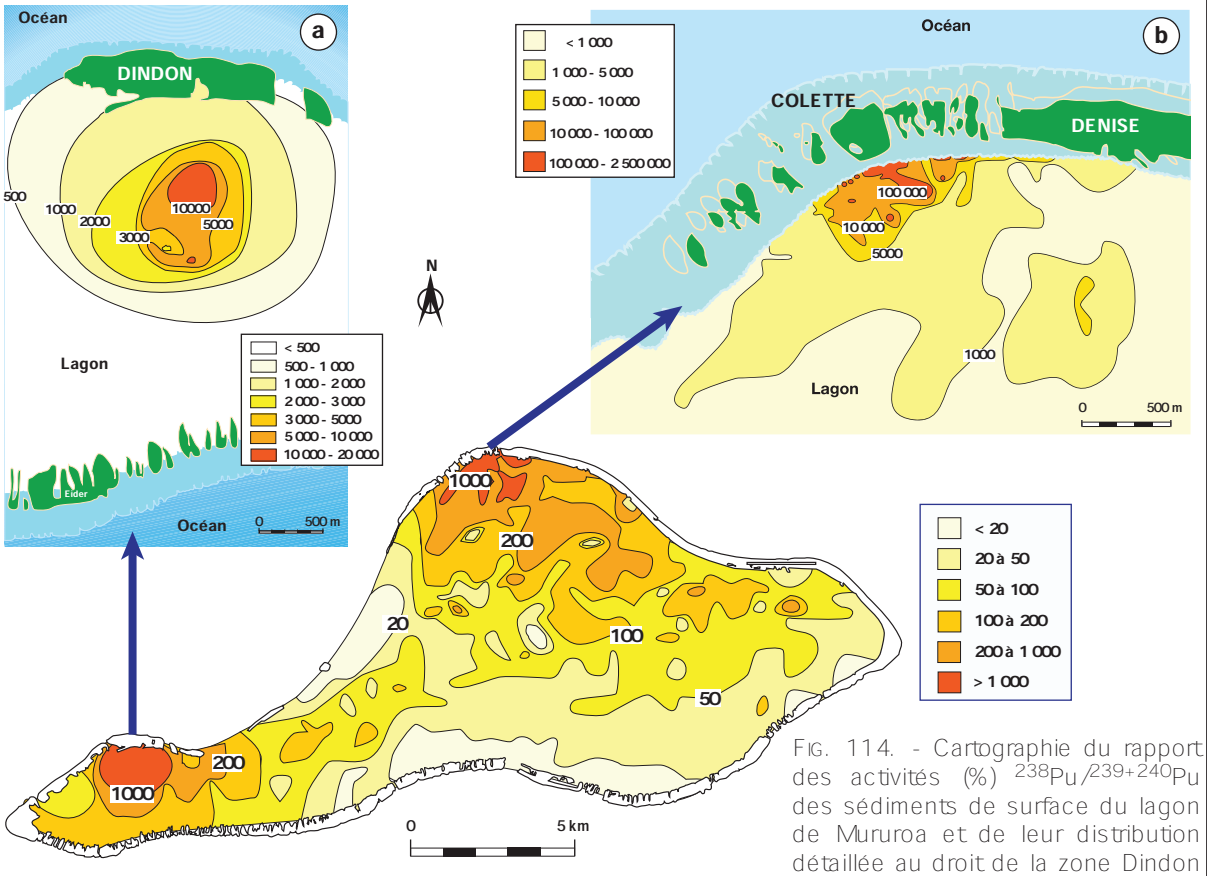


FIG. 114. - Cartographie du rapport des activités (%) $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ des sédiments de surface du lagon de Mururoa et de leur distribution détaillée au droit de la zone Dindon (a) et dans le secteur Nord (b).

À la verticale des points zéro des essais sur barge, l'activité dans les sédiments se répartissait sur les premiers mètres de profondeur. En zone Dindon, touchée par les retombées de l'essai Sirius, l'activité était maximale entre 0,5 et 2,5 m sous la surface sédimentaire, et devenait inférieure à 1 000 Bq.kg^{-1} sec à partir de 3,5 m de profondeur (Fig. 115a). Dans la même zone, au voisinage du point zéro de l'essai Aldébaran, l'activité massique passait par deux *maxima*, le plus important atteignait 38 000 Bq.kg^{-1} sec à 0,75 m sous la surface des sédiments et était dû aux retombées de l'essai Aldébaran, l'autre à 29 000 Bq.kg^{-1} sec à 0,3 m sous la surface, correspondait à celles de l'essai Sirius. Au-delà d'une profondeur de 1,5 m, l'activité massique était inférieure à 500 Bq.kg^{-1} sec, puis inférieure à 50 Bq.kg^{-1} sec à une profondeur supérieure à 2,7 m sous la surface sédimentaire. À partir d'une distance de 100 mètres de ces points zéro, l'activité était concentrée dans les 40 premiers centimètres de sédiments.

Au niveau du banc Colette, l'activité était répartie, de façon homogène, dans toute l'épaisseur des sédiments entre 0,50 m et 1 m. Certaines particules du banc Colette pouvaient avoir une masse de l'ordre du milligramme et atteindre individuellement des activités supérieures à 100 000 Bq. Au-delà du tombant, l'activité associée aux radionucléides d'origine artificielle n'était décelable que dans la couche de surface (Fig. 115b).

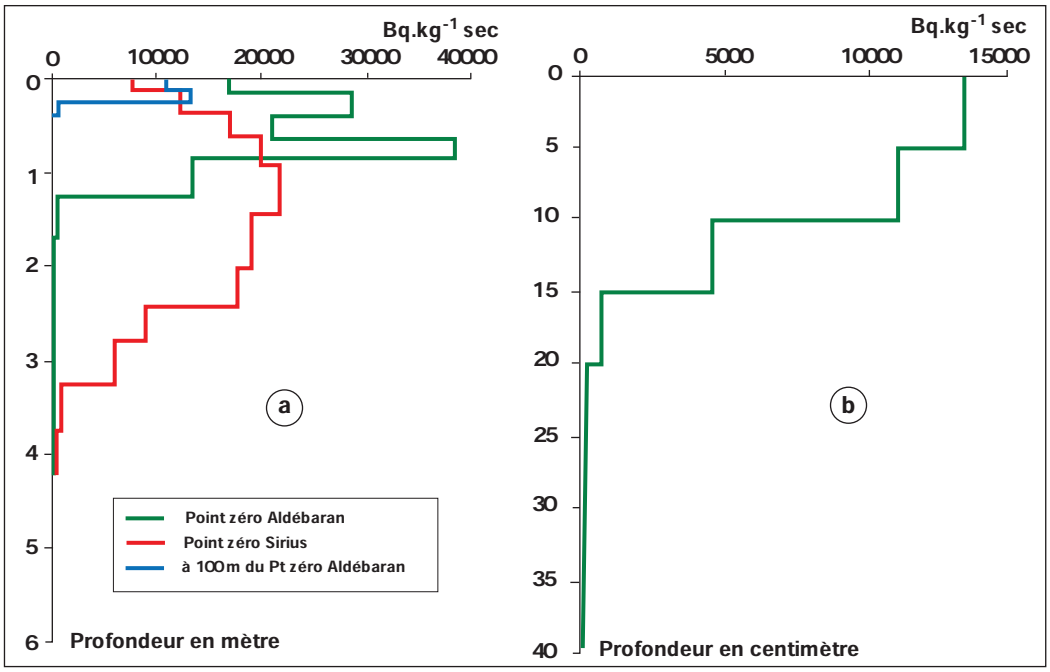


FIG. 115. - Évolution de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en $^{239+240}$Pu au sein de la colonne sédimentaire, au droit du point Dindon, dans la partie Ouest (a) et du banc Colette dans le secteur Nord (b) de l'atoll de Mururoa.

En dehors des trois zones précédemment citées, l'activité en $^{239+240}$Pu des sédiments du lagon de Mururoa était inférieure à 1 000 Bq.kg^{-1} sec (Fig. 114). Environ 70 % de la surface sédimentaire du lagon était caractérisée par une activité massique en $^{239+240}$Pu inférieure à 100 Bq.kg^{-1} sec. Les sédiments bordant la côte Sud et ceux de la passe avaient des activités massiques inférieures à 20 Bq.kg^{-1} sec. Dans ces zones, à la différence du banc Colette, l'activité du plutonium était préférentiellement associée aux particules fines, inférieures à 40 micromètres.

En 1993, l'activité massique du plutonium de huit échantillons de sédiments du lagon a été déduite de résultats obtenus par ICP-MS (Spectrométrie d'émission atomique de plasma avec couplage inductif), afin de distinguer les isotopes 239 et 240 du plutonium. Le rapport d'activité ^{240}Pu/^{239}Pu variait, selon les zones de prélèvement, entre 12 % et 18 %. La distribution géographique des activités massiques en ^{238}Pu était proche de celle du $^{239+240}$Pu. Les activités massiques maximales atteignaient 7 800 et 2 100 Bq.kg^{-1} sec au droit des points Dindon et Denise et 550 Bq.kg^{-1} sec, au niveau du banc Colette.

Au droit du point Dindon, le rapport des activités ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu variait de moins 20 %, sous l'influence prépondérante de l'essai Aldébaran, à près de 60 % sous l'influence prépondérante de l'essai Sirius (Fig. 116a). Au droit du point Denise, le rapport d'activité ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu était d'environ 30 % et sur le banc Colette était inférieur à 1 % (Fig. 116b). Dans le reste du lagon, ce rapport était le plus souvent compris entre 20 et 30 % (Fig. 116).

À Fangataufa, l'activité massique des radionucléides artificiels détectés dans les sédiments, principalement due aux $^{239+240}$Pu, décroissait en fonction de l'éloignement du point zéro de l'essai Rigel (Fig. 117a). L'activité de ces radionucléides variait de 20 000 Bq.kg^{-1} sec dans les sédiments de surface au droit du point zéro, à quelques Bq.kg^{-1} sec, dans ceux de la côte Ouest de l'atoll.

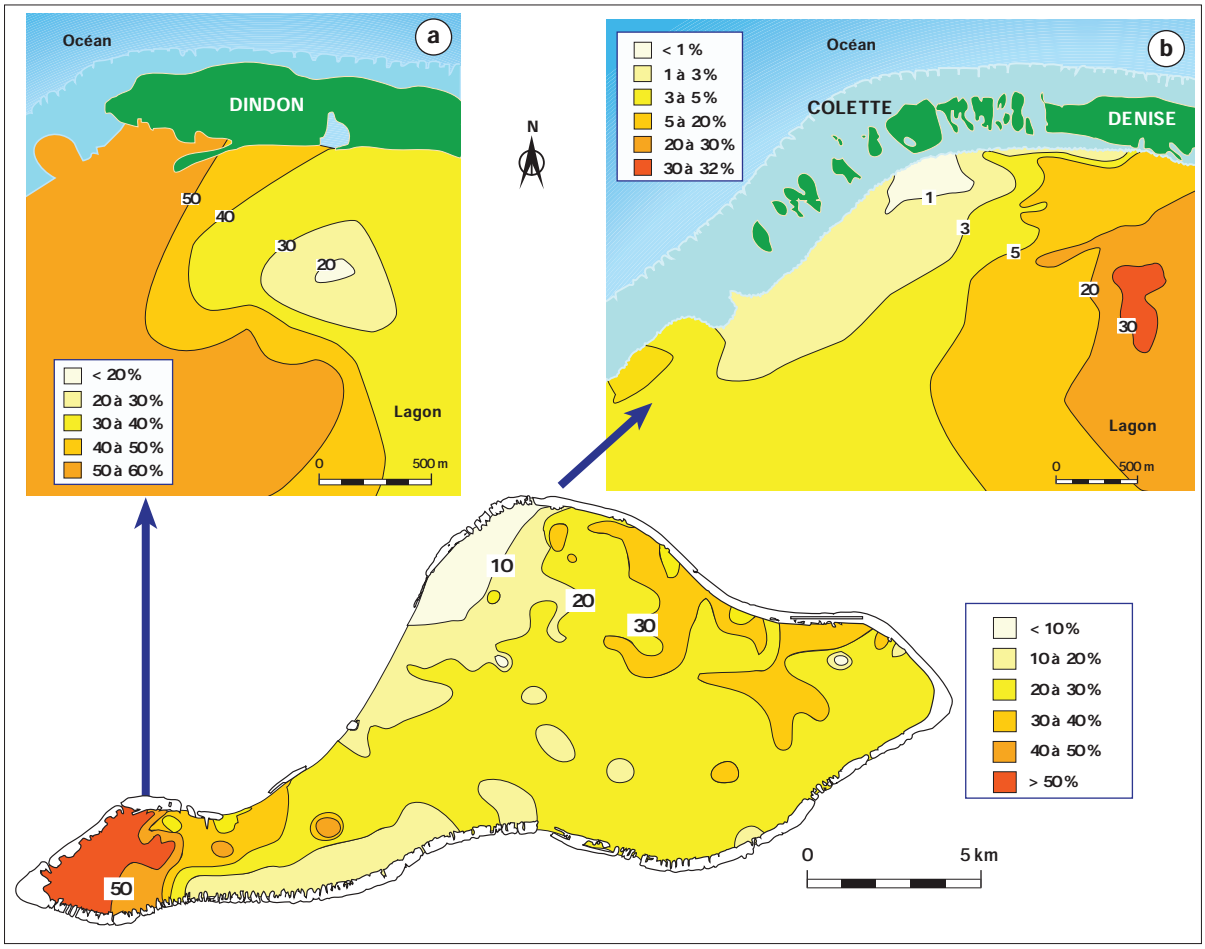


FIG. 116. - Cartographie du rapport des activités (%) $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ des sédiments de surface du lagon de Mururoa (01.04.1984). La distribution détaillée du rapport $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ dans les sédiments de surface au droit du point Dindon (a) et en partie Nord de l'atoll (b) est précisée.

En 1993, les mesures par ICP-MS des isotopes du plutonium de cinq échantillons de sédiments du lagon ont révélé des rapports d'activité $^{240}Pu/^{239}Pu$ constants de 18 %.

La localisation géographique de l'activité massique maximale en ^{238}Pu dans les sédiments de surface était très proche de celle du $^{239+240}Pu$. Le rapport d'activité $^{238}Pu/^{239+240}Pu$, plus stable qu'à Mururoa, y était compris entre 30 et 47 % (Fig. 117b).

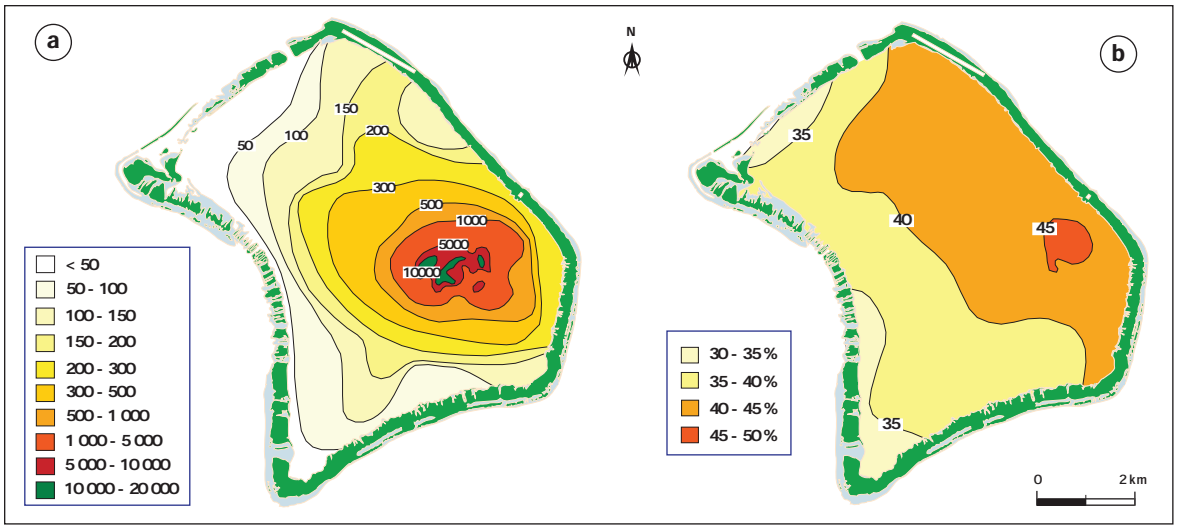


FIG. 117. - Cartographie de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en $^{239+240}$Pu (a) et du rapport des activités (%) ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu présentes dans les sédiments de surface du lagon de Fangataufa (01.09.1987).

IV.5.3 - BILAN

L'extrapolation des activités au 1er janvier 2006 des principaux radionucléides artificiels dans les sédiments des lagons a été réalisée en considérant la distribution spatiale, tant horizontale que verticale, de leurs activités respectives mesurées entre 1984 et 1990 et en appliquant une densité moyenne de 1,4 pour l'ensemble des sédiments.

L'activité totale en $^{239+240}$Pu résultant des essais atmosphériques et de sécurité a été estimée à $1,8.10^{13}$ et $7,4.10^{12}$ Bq, à Mururoa et à Fangataufa respectivement. Ces activités représentent des masses résiduelles de ^{239}Pu dans les sédiments de l'ordre de 6,7 kg et 2,7 kg respectivement à Mururoa et Fangataufa.

L'activité totale des radionucléides les plus solubles, comme le ^{137}Cs et le ^{60}Co a été estimée, à $6,4.10^{11}$ et $1,2.10^{11}$ Bq, dans les sédiments de Mururoa, et à $1,6.10^{11}$ et $1,0.10^{10}$ Bq, dans ceux de Fangataufa (Tableau 32). Pour ces radionucléides, le bilan est surestimé car il n'a pas été tenu compte des pertes par solubilisation depuis la date des prélèvements.

TABLEAU 32.
Estimation des activités totales (Bq) au 1er janvier 2006 des principaux radionucléides mesurés dans les sédiments des lagons de Mururoa et Fangataufa.

Radionucléide	Mururoa	Fangataufa
^{60}Co	$1,2.10^{11}$	$1,0.10^{10}$
^{125}Sb	$1,7.10^{9}$	$0,4.10^{9}$
^{137}Cs	$6,4.10^{11}$	$1,6.10^{11}$
^{155}Eu	$1,9.10^{11}$	$1,2.10^{11}$
^{238}Pu	$3,1.10^{12}$	$2,8.10^{12}$
$^{239+240}$Pu	$1,8.10^{13}$	$7,4.10^{12}$
^{241}Am	$8,4.10^{11}$	$3,9.10^{11}$

IV.6 - FLORE ET FAUNE MARINES

Entre 1967 et 1999, près de 12 000 échantillons appartenant à différentes espèces de la flore et de la faune marines ont été prélevés dans les lagons de Mururoa et Fangataufa. La répartition relative du nombre d'échantillons en fonction des espèces prélevées montre que ce sont les poissons qui ont fait l'objet du plus grand nombre de prélèvements dans le cadre de la surveillance radiologique (Fig. 118). La plupart de ces échantillons ont fait l'objet de différents types de mesures d'activité massique : indice bêta global, radionucléides émetteurs gamma, ^{3}H, ^{90}Sr, ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$. Les résultats de la surveillance radiologique du milieu vivant des deux lagons sont présentés selon les principaux groupes taxonomiques décrits dans les chapitres I et III, en fonction de la période des radionucléides : courte, moyenne ou longue.

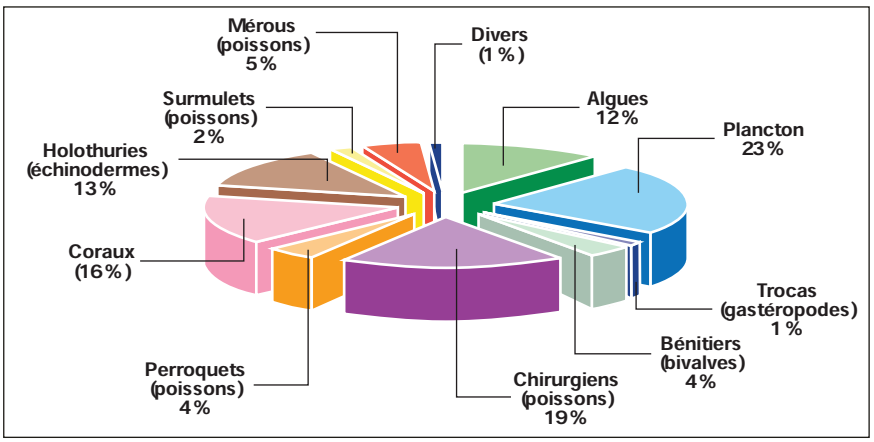


FIG. 118. - Répartition relative (en pourcentage) des échantillons ; en fonction des espèces de la flore et de la faune prélevées, entre 1967 et 1999, dans le cadre de la surveillance radiologique des lagons de Mururoa et Fangataufa.

IV.6.1 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE INFÉRIEURE OU ÉGALE À L'ANNÉE

Les radionucléides de période radioactive inférieure à l'année ont été détectés dans les différentes espèces végétales et animales prélevées dans le cadre de la surveillance radiologique. Il s'agissait essentiellement des ^{57}Co, ^{58}Co, ^{54}Mn, ^{65}Zn, ^{95}Zr, ^{106}Ru, ^{103}Ru, ^{144}Ce et ^{141}Ce auxquels il faut ajouter les ^{131}I et ^{140}Ba, lorsque les niveaux d'activité permettaient leur quantification malgré les délais entre les dates de prélèvement et de mesure.

IV.6.1.1 - PLANCTON

Le plancton absorbe et concentre très rapidement les radionucléides artificiels présents dans l'eau de mer. Pour cette raison, dans le cadre de la surveillance radiologique, il a été utilisé comme bioindicateur afin de quantifier l'importance des retombées immédiates lors des essais atmosphériques, ou celle des fuites provoquées par les post-forages dans les cavités-cheminées créées par les essais souterrains. Entre 1970 et 1999, un millier de prélèvements de plancton ont été effectués dans le lagon de Mururoa et plus d'une centaine dans le lagon de Fangataufa. La biomasse planctonique utilisée pour les analyses radiologiques était essentiellement animale (zooplancton).

Les radionucléides de courte période régulièrement détectés dans le plancton collecté pendant la période des essais atmosphériques étaient essentiellement les ^{57}Co, ^{58}Co, ^{54}Mn, ^{65}Zn, ^{95}Zr, ^{106}Ru, ^{103}Ru, ^{144}Ce et ^{141}Ce. Le suivi radiologique du plancton permettait donc de décrire l'évolution des activités de ces radionucléides dans les eaux de mer après chaque essai atmosphérique, les niveaux résiduels des radionucléides à vie courte du plancton redevenant très rapidement inférieurs aux limites de détection.

Pendant la période des essais souterrains, l'apparition temporaire de radionucléides à vie courte résultait de la libération d'une partie des gaz radioactifs sous pression dans la cavité-cheminée qui remontaient vers la surface par le puits de post-forage, ainsi que le rejet dans le lagon d'eaux de rinçage ou d'effluents provenant des tubes de carottages ayant pénétré la cavité. Les prélèvements pouvant être réalisés immédiatement après les essais, la capacité d'accumulation rapide du plancton a ainsi été confirmée. Ainsi, les radionucléides à vie courte comme ^{131}I et ^{140}Ba, de périodes respectives 8 et 12,8 jours, ont pu être mesurés dans le plancton (Fig. 119).

Par exemple, le 26 mai 1987, dès la pénétration du forage dans la cavité créée par l'essai Jocaste, l'activité massique en ^{131}I atteignait 700 $Bq.kg^{-1}$ frais dans le plancton prélevé, le jour même, dans la zone de la tête de puits, et une valeur maximale de 5 600 $Bq.kg^{-1}$ frais, le 2 juin au matin. Quinze jours plus tard, les niveaux des radionucléides à vie courte dans le plancton du lagon de Mururoa n'étaient plus quantifiables en raison de la décroissance radioactive et de la dilution de l'activité des masses d'eau du lagon par les eaux océaniques entrant par la passe et les *hoa*.

En revanche, l'activité massique du ^{60}Co dans le plancton n'était pas influencée par les opérations de post-forage décroissant suivant une période apparente de 3 ans.

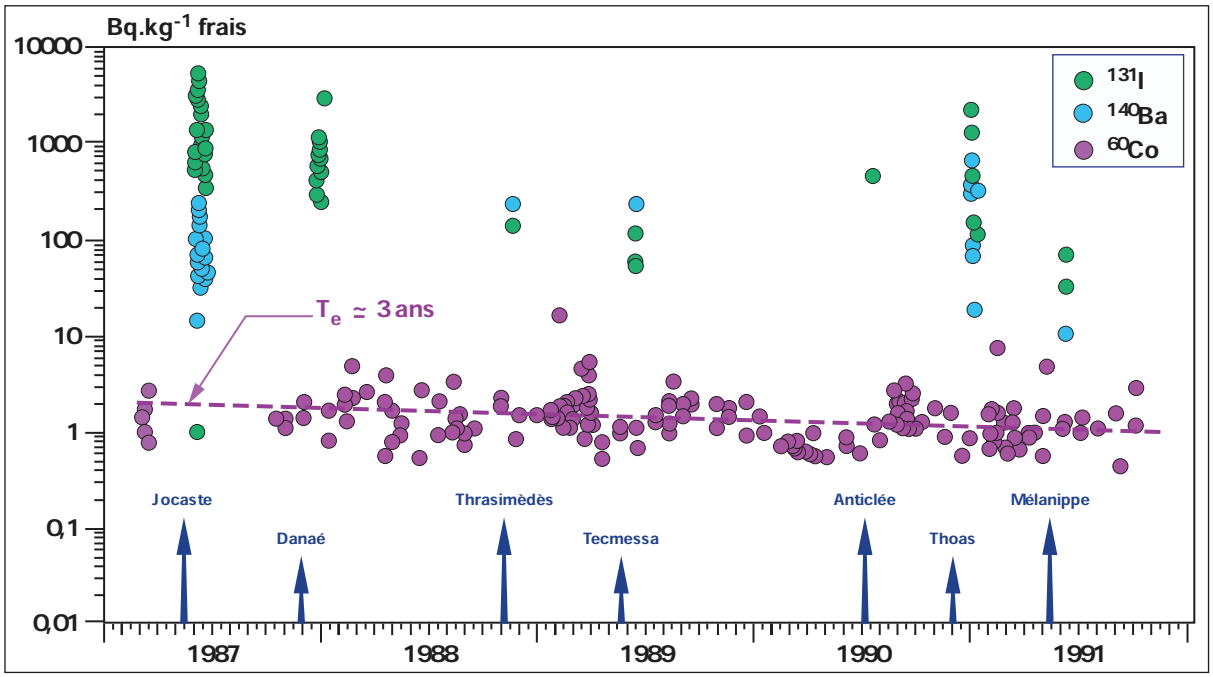


FIG. 119. - Évolution de l'activité massique ($Bq.kg^{-1}$ frais) en ^{131}I, ^{140}Ba et ^{60}Co du plancton collecté dans le lagon de Mururoa entre 1987 et 1991.

IV.6.1.2 - CORAUX

Les activités massiques maximales des coraux du lagon de Fangataufa ont été atteintes en 1967, au début de la période des essais atmosphériques. Elles étaient alors de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de Bq.kg^{-1} frais en ^{95}Zr, ^{144}Ce, ^{106}Ru et en ^{58}Co. Associés à ce dernier, d'autres produits d'activation, ^{65}Zn, ^{54}Mn, ^{110m}Ag et ^{57}Co, ont également été détectés. L'activité massique de ces produits d'activation a décru très rapidement et n'était plus quantifiable après 1972. L'activité massique des produits de fission, de l'ordre de 10 Bq.kg^{-1} frais de ^{144}Ce et de ^{106}Ru en 1975 et 1977 et de 2 Bq.kg^{-1} frais de ^{95}Zr en 1976, a décru rapidement, jusqu'à n'être plus quantifiable à la fin de l'année 1977 (Fig. 120).

La période de décroissance effective (T_e) de ces radionucléides était du même ordre de grandeur que leur période radioactive. À l'exception du ^{95}Zr, de période radioactive plus courte que les autres radionucléides, la décroissance de la majorité d'entre eux pouvait être représentée par une droite de régression, pour l'ensemble de la période des retombées des essais atmosphériques.

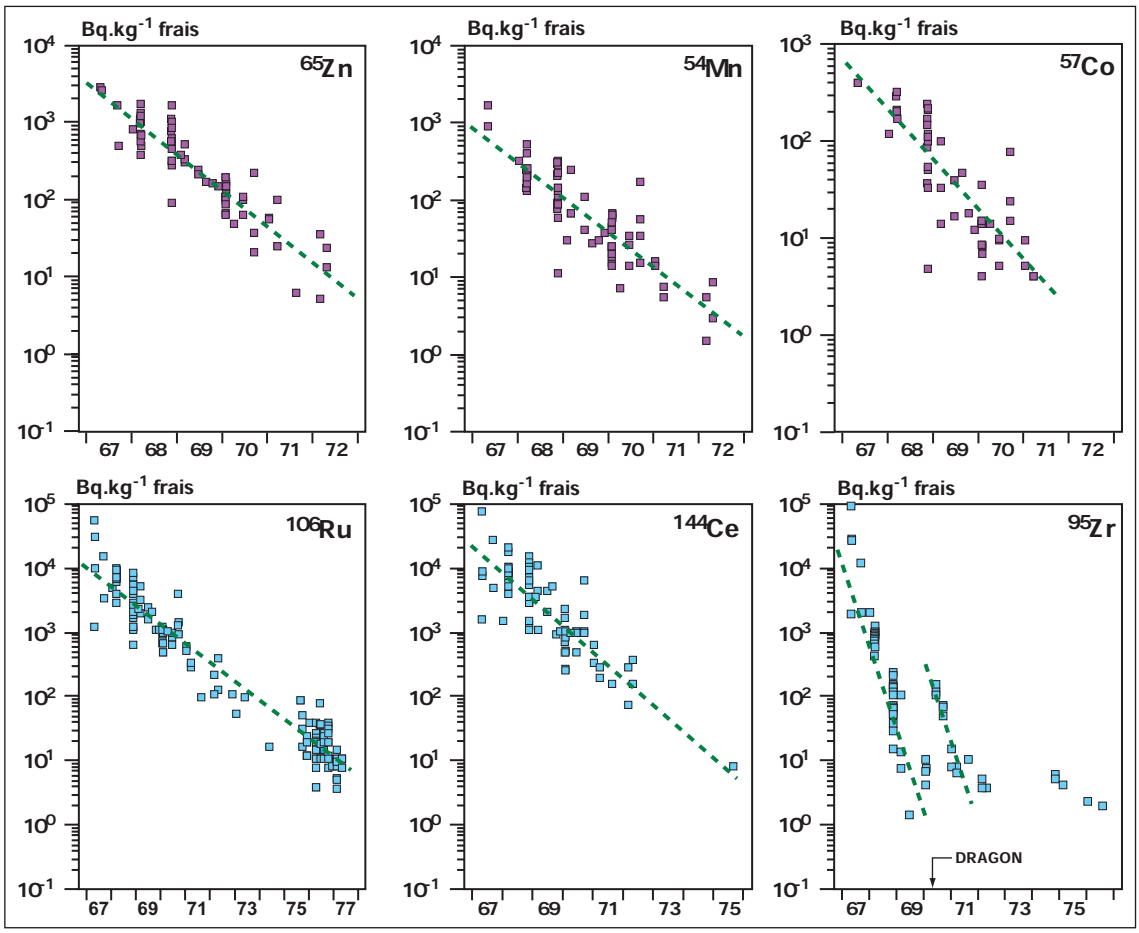


FIG. 120. - Évolution, au cours du temps, des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) en ^{65}Zn, ^{57}Co, ^{54}Mn, ^{106}Ru, ^{144}Ce et ^{95}Zr des coraux du lagon de Fangataufa prélevés lors de la période des essais atmosphériques.

À partir de 1970, les résultats de mesure de l'activité massique des coraux prélevés à Mururoa mettaient en évidence des niveaux inférieurs à ceux des coraux issus du lagon de Fangataufa (Tableau 33).

TABLEAU 33.
Activité massique (Bq.kg^{-1} frais) des principaux radionucléides émetteurs gamma à vie courte, mesurés dans des échantillons de coraux prélevés, en 1970-1971, dans le lagon de Mururoa.

Radionucléide et période physique	Lagon de Mururoa		
	Activité maximale (Bq.kg^{-1} frais)	*Nombre de mesures significatives*	Date
^{58}Co (70,8 jours)	8,1	*1*	12/06/70
^{65}Zn (244 jours)	170	*46*	14/04/70
^{57}Co (272 jours)	310	*26*	14/04/70
^{54}Mn (312 jours)	100	*42*	13/10/71
^{110m}Ag (250 jours)	15	*7*	07/01/71
^{95}Zr (64 jours)	66	*30*	26/07/71
^{144}Ce (284 jours)	2 800	*28*	22/01/70
^{106}Ru (373 jours)	850	*60*	22/01/70

IV.6.1.3 - MOLLUSQUES

L'évolution temporelle de l'activité massique des mollusques a été appréciée par le suivi radiologique des turbos et des bénitiers prélevés à Mururoa et Fangataufa, respectivement sur le platier externe et dans les lagons. Durant la période des essais atmosphériques, les activités massiques des radionucléides présents dans les échantillons de ces deux espèces de mollusques étaient généralement à des niveaux plus élevés dans les viscères et l'hépatopancréas que dans la chair. Le rapport moyen entre l'activité des viscères et celle de la chair, des principaux radionucléides détectés dans le turbo, était compris entre 1,9 et 7 (Tableau 34). Le même constat a été fait pour l'hépatopancréas du bénitier, qui est un organe d'accumulation, présentant des niveaux d'activité 50, 35, 12 et 6 fois supérieurs aux autres organes de l'animal, respectivement en ^{60}Co, ^{57}Co, ^{54}Mn et ^{106}Ru.

Les ^{95}Zr et ^{144}Ce ont été détectés dans les turbos et les bénitiers de Mururoa et de Fangataufa, jusqu'en 1976. Les activités massiques les plus élevées ont été observées après les campagnes d'essais atmosphériques de 1969, 1970 et 1971. L'activité massique maximale apparaissait entre 2 et 3 mois après la fin de chaque campagne d'essais, pour décroître ensuite rapidement, jusqu'à la campagne suivante (Fig. 121). Ces données ont été utilisées pour calculer les périodes de décroissance effective du ^{95}Zr et du ^{144}Ce pour ces deux mollusques. Les périodes de décroissance effective de ces radionucléides sont égales à leurs périodes radioactives.

TABLEAU 34.
Rapport entre les activités massiques des principaux radionucléides mesurés dans les viscères et la chair des mêmes turbos, prélevés pendant la période des essais atmosphériques.

Radionucléide	Rapport d'activité entre les fractions viscère et chair	
	Moyenne	*Nombre de mesures*
^{95}Zr	2,5	*288*
^{106}Ru	6,8	*109*
^{137}Cs	2,6	*32*
^{141}Ce	4,3	*26*
^{144}Ce	3,2	*225*
^{57}Co	4,2	*42*
^{60}Co	4,5	*321*
^{65}Zn	2,1	*83*
^{110m}Ag	7,0	*84*
$^{239+240}$Pu	1,9	*61*

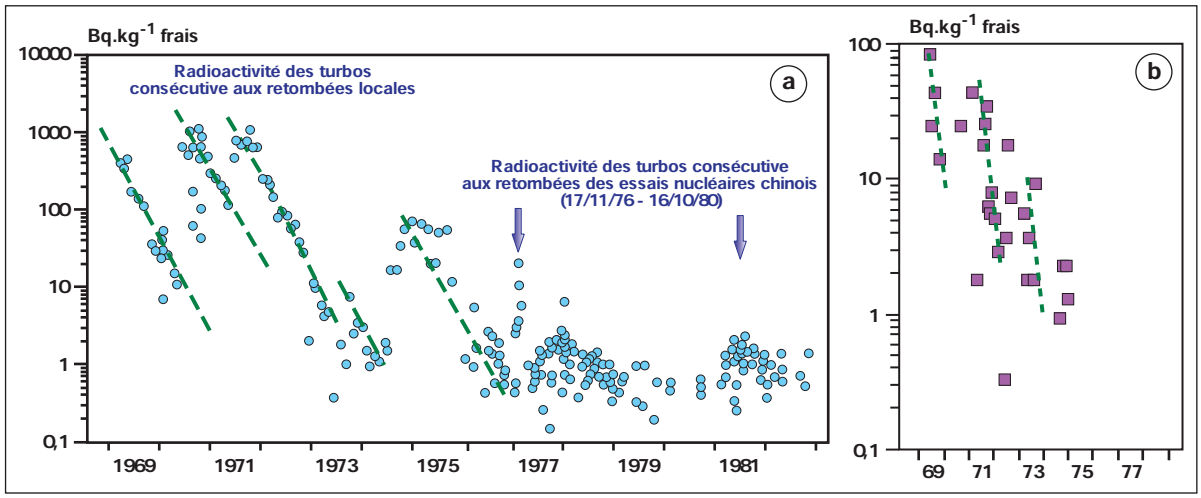


FIG. 121. - Évolution, au cours du temps, de l'activité massique (Bq.kg^{-1} frais) du ^{95}Zr des viscères des turbos (a) et de la chair des bénitiers (b), prélevés dans le lagon de Mururoa.

Les périodes de décroissance effectives des ^{57}Co, ^{54}Mn et ^{106}Ru calculées pour les bénitiers prélevés à Mururoa, étaient du même ordre de grandeur que leurs périodes radioactives respectives. (Fig. 122).

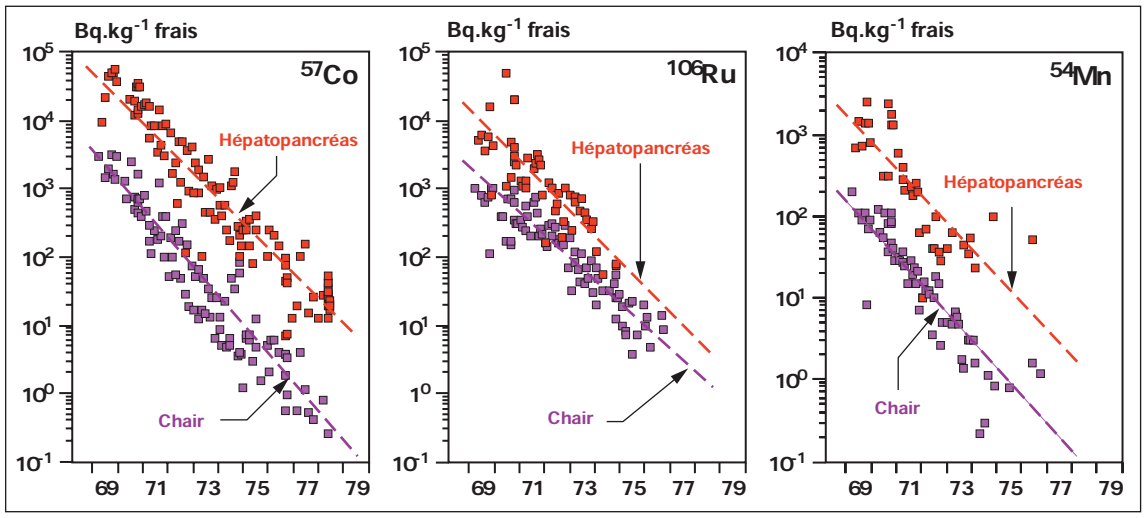


FIG. 122. - Évolution, au cours du temps, des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) en ^{57}Co, ^{106}Ru et ^{54}Mn mesurées dans la chair (points violets) et l'hépatopancréas (points rouges) des bénitiers prélevés dans le lagon de Mururoa principalement lors de la période des essais atmosphériques.

Bien que ces deux espèces développent des modes de vie et d'alimentation différents, le turbo est un mollusque mobile brouteur tandis que le bénitier est un bivalve filtreur fixé sur les substrats, leurs niveaux d'activités demeurent proches, tant pour ceux prélevés dans le lagon de Mururoa que pour ceux issus du lagon de Fangataufa, durant la période des essais atmosphériques.

À la fin de l'année 1977 et au milieu d'année 1981, une augmentation ponctuelle du ^{95}Zr a été mesurée dans les échantillons de turbo prélevés à Mururoa et Fangataufa, mais aussi, simultanément, sur tous ceux prélevés en Polynésie française. Les activités massiques détectées étaient identiques sur l'ensemble des échantillons. Simultanément, les stations de contrôle de la radioactivité atmosphérique au niveau mondial mettaient en évidence une augmentation de l'activité volumique en ^{95}Zr, qui a été attribuée dans les deux cas aux retombées mondiales des essais nucléaires mégatonniques du 17 novembre 1976 et du 16 octobre 1980, réalisés dans l'atmosphère par la République populaire de Chine.

IV.6.1.4 - POISSONS

Parmi les poissons herbivores, les poissons perroquets présentaient des niveaux d'activité massique en radionucléides à vie courte supérieurs à ceux des poissons chirurgiens. Les niveaux les plus élevés ont été observés dans les premières années de la période des essais atmosphériques. La décroissance rapide des radionucléides initialement présents dans les eaux immédiatement après les essais, associée aux déplacements fréquents de ces poissons le long de la côte récifale externe, explique probablement l'homogénéité spatiale observée. Les graphiques de ce paragraphe présentent l'évolution, au cours du temps, des activités massiques des poissons, tous secteurs confondus. L'activité massique des poissons collectés sur le platier externe des deux atolls, a décru rapidement jusqu'en 1978 (Fig. 123).

Au niveau des lagons, les activités massiques des poissons chirurgiens et perroquets de Fangataufa étaient généralement supérieures à celles mesurées à Mururoa ; mais aucune hétérogénéité spatiale n'apparaissait au sein de chaque atoll.

Pendant la période des essais atmosphériques, l'activité des ^{57}Co, ^{54}Mn et ^{65}Zn a décru régulièrement pour atteindre, en 1974, les limites de détection des appareils de mesure de cette époque (Fig. 124). L'année de l'arrêt des essais atmosphériques, les niveaux d'activité étaient de l'ordre du Bq.kg frais, ou inférieurs. Pour chaque radionucléide, la période effective était sensiblement inférieure à la période radioactive.

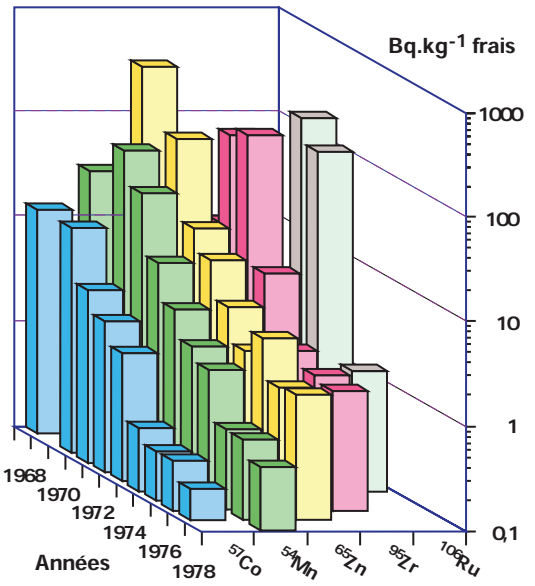


FIG. 123. - Évolution au cours du temps des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) en ^{54}Mn, ^{57}Co, ^{65}Zn, ^{95}Zr et ^{106}Ru de la chair des poissons perroquets prélevés sur le récif externe du lagon de Mururoa et de Fangataufa, au cours de la période des essais atmosphériques.

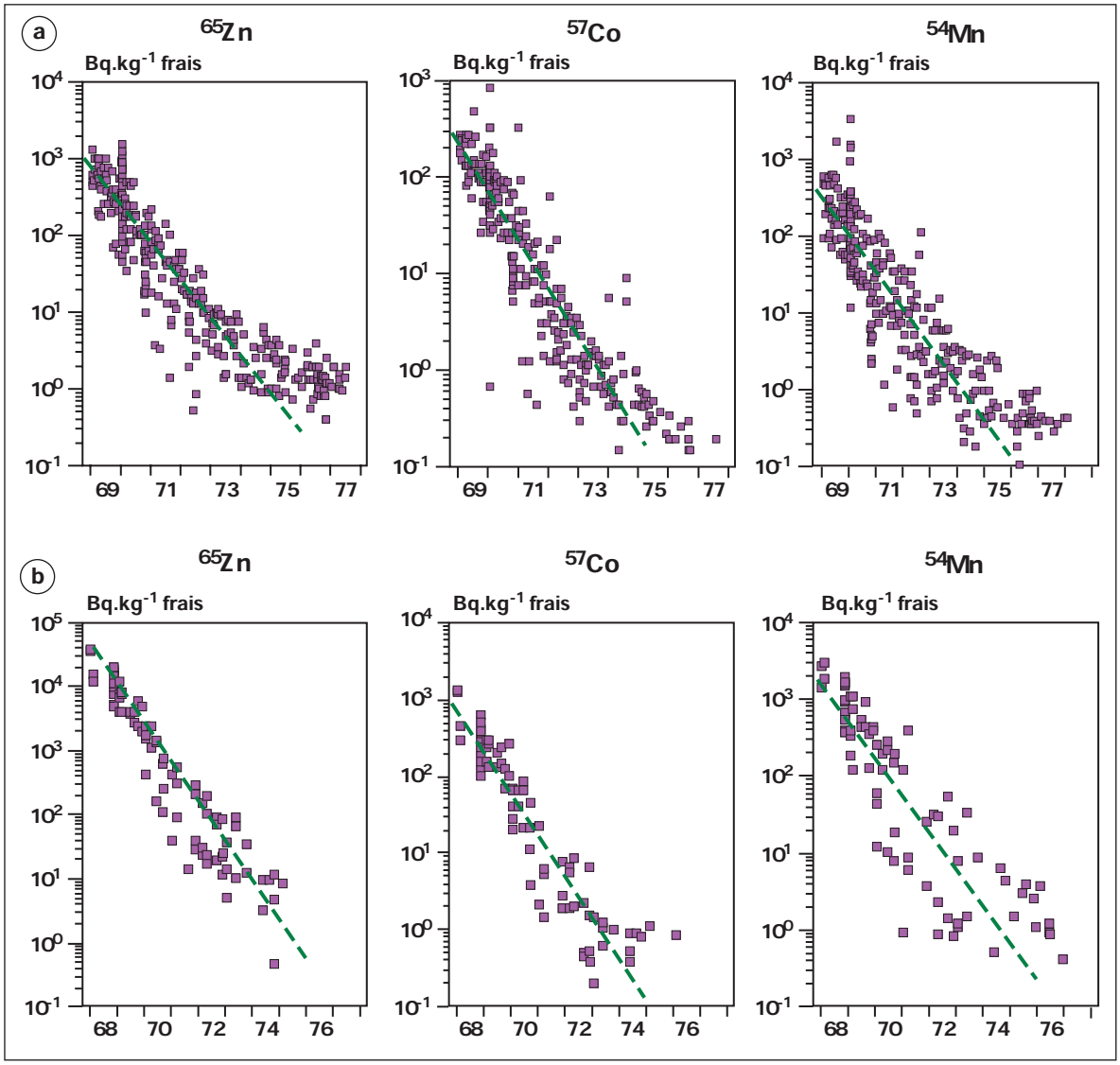


FIG. 124. - Évolution au cours du temps des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) en ^{54}Mn, ^{57}Co, ^{65}Zn de la chair des poissons perroquets et chirurgiens prélevés dans les lagons de Mururoa (a) et de Fangataufa (b), lors de la période des essais atmosphériques..

En ce qui concerne les poissons carnivores, comme les surmulets, l'évolution au cours du temps de l'activité massique de ces radionucléides était identique à celle des poissons herbivores (Fig. 125).

Pour les poissons surmulets, les activités massiques les plus élevées ont été observées au début de la période des essais atmosphériques avec le ^{54}Mn et le ^{57}Co atteignant respectivement 2 000 et 500 Bq.kg^{-1} frais, à Mururoa, en 1969. À Fangataufa, les activités massiques étaient plus élevées en ^{65}Zn, 23 000 et 6 200 Bq.kg^{-1} frais respectivement, en 1968 et 1969.

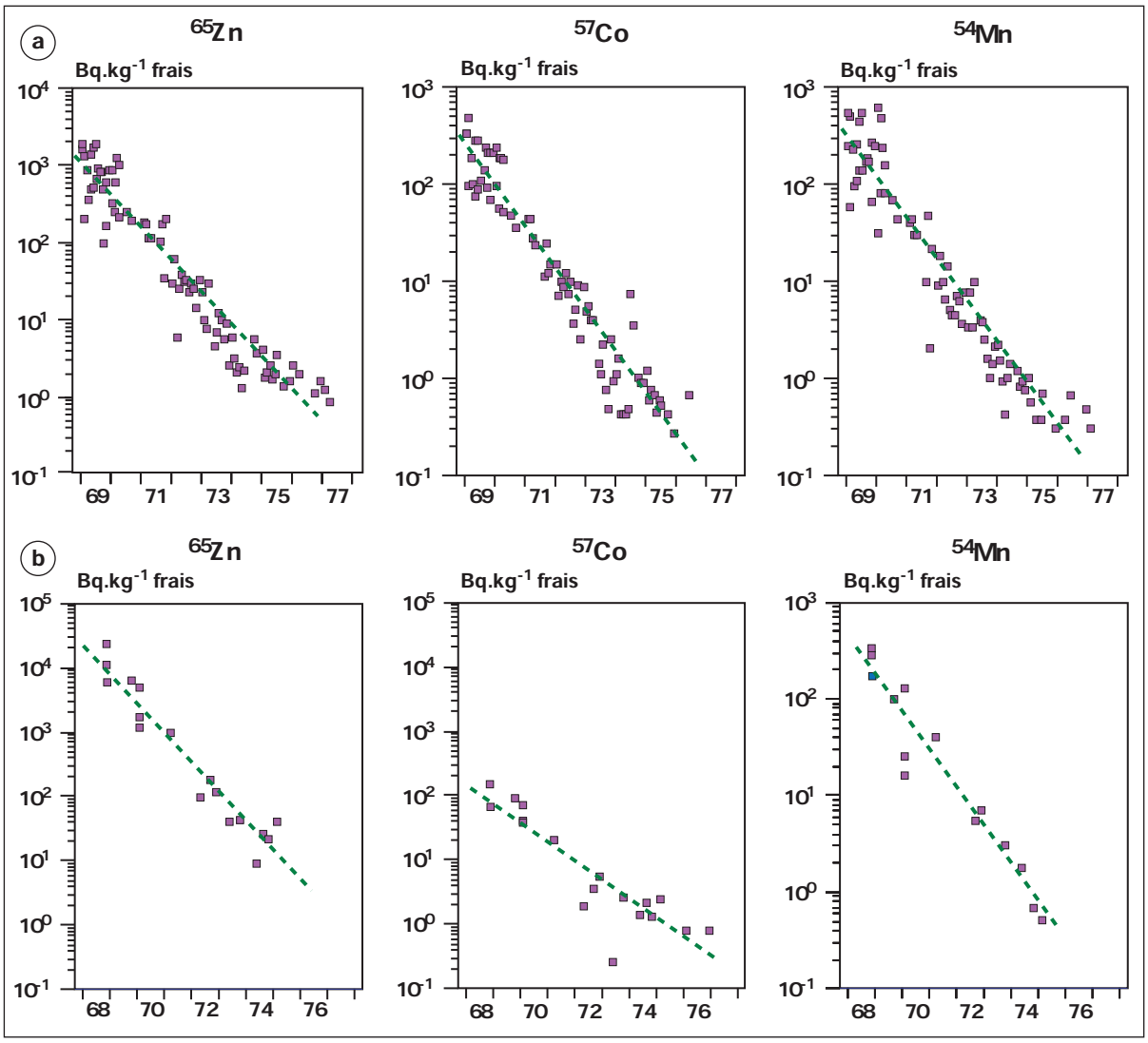


FIG. 125. - Évolution au cours du temps des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) en ^{54}Mn, ^{57}Co, ^{65}Zn des poissons surmulets éviscérés prélevés dans les lagons de Mururoa (a) et de Fangataufa (b), lors de la période des essais atmosphériques.

En revanche, les activités en ^{54}Mn et ^{57}Co y étaient moins élevées, respectivement 330 et 150 Bq.kg^{-1} frais en 1968. Les activités n'ont cessé ensuite de décroître, jusqu'aux limites de détection de ces radionucléides en 1974, les valeurs étant inférieures à quelques becquerels ou dixièmes de Bq.kg^{-1} frais. Comme cela a été observé sur la plupart des autres espèces du lagon et en particulier sur les poissons chirurgiens et perroquets, la période effective de chaque radionucléide était sensiblement inférieure à sa période radioactive.

Les mêmes radionucléides ont été mesurés chez les autres espèces de poissons carnivores, comme les mérous, avec des activités massiques évoluant de façon identique au cours du temps,

mais à des niveaux toujours supérieurs à Fangataufa (Fig. 126). Ils n'ont plus été détectés après 1977 et leur période effective était du même ordre de grandeur que leur période de radioactive.

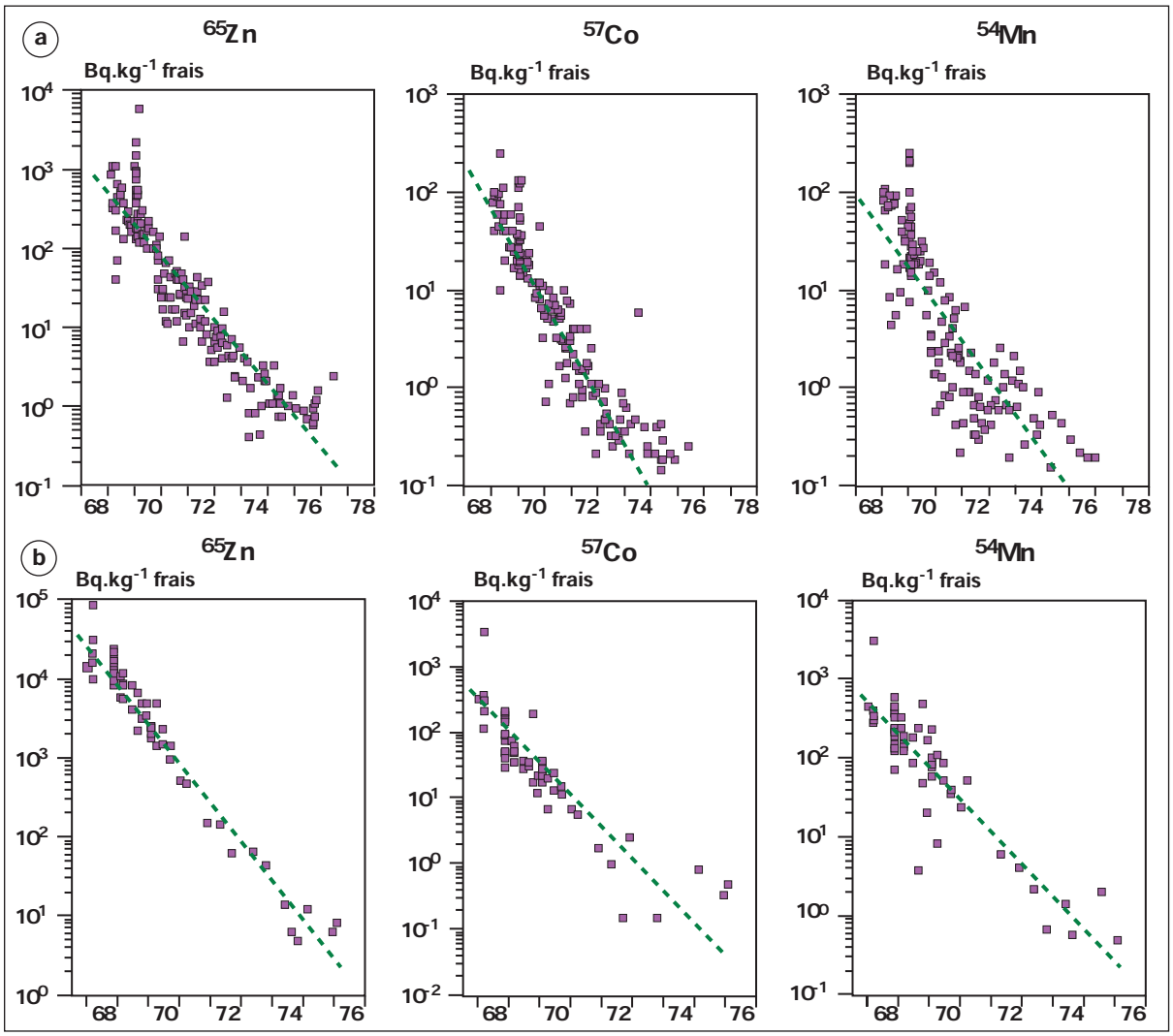


FIG. 126. - Évolution au cours du temps des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) en ^{54}Mn, ^{57}Co et du ^{65}Zn dans la chair des mérous, prélevés dans les lagons de Mururoa (a) et de Fangataufa (b), lors de la période des essais atmosphériques.

IV.6.1.5 - HOLOTHURIES

Les principaux radionucléides à vie courte ont également été détectés dans le tégument des holothuries prélevées à Mururoa et à Fangataufa, durant la période des essais atmosphériques. Le niveau de l'activité massique de ces radionucléides a diminué très rapidement au cours du temps (Fig. 127). Ceci s'explique par de faibles retombées lors des essais sous ballon, donc une

plus faible contamination des sédiments dont se nourrissent les holothuries. L'ensemble de ces radionucléides ne seront plus décelés après 1975. Leur période de décroissance effective est inférieure à leur période de décroissance radioactive pour l'ensemble des radionucléides.

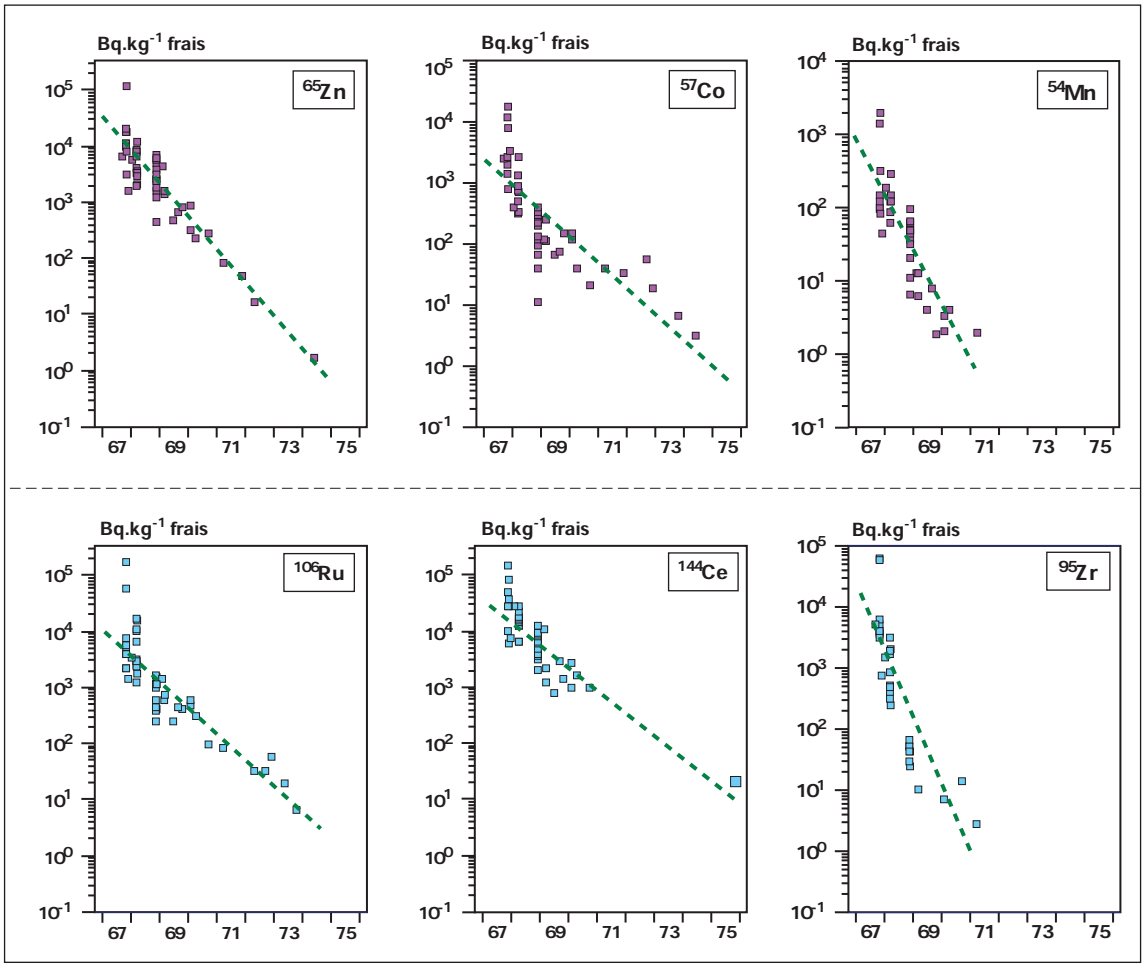


FIG. 127. - Évolution au cours du temps des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) en ^{54}Mn, ^{57}Co, ^{65}Zn, ^{106}Ru, ^{144}Ce et ^{95}Zr dans le tégument des holothuries noires prélevées dans le lagon de Fangataufa, lors de la période des essais atmosphériques

IV.6.2 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE SUPÉRIEURE À 5 ANS

Les principaux radionucléides de période supérieure à 5 ans, régulièrement mesurés dans les bioindicateurs collectés pendant la période des essais atmosphériques, étaient le ^{60}Co, le ^{238}Pu, et le $^{239+240}$Pu associé dans une moindre mesure au ^{137}Cs et ^{90}Sr.

IV.6.2.1 - ALGUES BENTHIQUES

Pendant la période des essais atmosphériques, le ^{60}Co était le principal radionucléide de période supérieure à 5 ans mesuré régulièrement, avec parfois quelques traces de ^{137}Cs. Les activités massiques les plus élevées en ^{60}Co dans les algues benthiques ont été observées au début de la période des essais atmosphériques pour décroître par la suite.

Ainsi, les niveaux annuels moyens étaient de l'ordre de 100 Bq.kg^{-1} frais dans les algues prélevées à Mururoa en 1970, de 10 Bq.kg^{-1} frais à l'arrêt des essais atmosphériques en 1974 et de 0,40 Bq.kg^{-1} frais à l'arrêt des essais souterrains, en 1996 (Tableau 35).

Les quantités d'algues benthiques naturellement présentes étant insuffisantes pour la mesure, des panneaux immergés favorisant leur croissance ont été mis en place à partir de 1982. À partir de cette date, le nombre d'échantillons a donc significativement augmenté, permettant de suivre régulièrement la décroissance de l'activité massique des algues ; celle-ci passant de 6,3 Bq.kg^{-1} frais, en moyenne, en 1982, à 0,47 Bq.kg^{-1} frais, en moyenne, en 1997. La période de décroissance effective du ^{60}Co dans les algues benthiques, calculée entre 1982 et 1997, était de l'ordre de 3 ans, c'est-à-dire inférieure à sa période radioactive et identique à celle calculée pour le plancton (Fig. 128).

TABLEAU 35.
Évolution annuelle des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) moyennes en ^{60}Co, ^{137}Cs et ^{241}Am des algues benthiques prélevées dans le lagon de Mururoa entre 1970 et 1997.
Le tiret signale l'absence de résultat.

Année	Radionucléides					
	^{137}Cs		^{60}Co		^{241}Am	
	Act.	(Nb.)	Act.	(Nb.)	Act.	(Nb.)
1970	-	-	103	(3)	-	-
1971	-	-	103	(3)	-	-
1972	-	-	16	(5)	-	-
1973	1,3	(1)	15	(5)	-	-
1974	3,5	(1)	8,9	(4)	-	-
1975	-	-	13	(1)	-	-
1976	0,37	(1)	14	(1)	-	-
1977	-	-	-	-	-	-
1978	-	-	10	(2)	-	-
1979	-	-	-	-	-	-
1980	-	-	-	-	-	-
1981	-	-	15	(3)	-	-
1982	0,13	(2)	6,3	(13)	0,93	(1)
1983	0,76	(2)	3,4	(13)	-	-
1984	2,3	(7)	8,8	(75)	≤ 0,17	(1)
1985	1,8	(11)	5,8	(91)	37	(1)
1986	0,62	(17)	4,6	(73)	4,3	(3)
1987	0,71	(7)	3,0	(115)	0,08	(5)
1988	1,2	(9)	2,1	(134)	0,04	(1)
1989	≤ 0,63	(124)	1,2	(157)	-	-
1990	≤ 0,46	(140)	0,81	(140)	≤ 0,23	(57)
1991	≤ 0,30	(75)	0,95	(75)	0,35	(31)
1992	≤ 0,20	(90)	0,83	(90)	2,1	(67)
1993	≤ 0,14	(92)	0,67	(92)	3,3	(57)
1994	≤ 0,12	(48)	0,52	(48)	0,41	(45)
1995	≤ 0,10	(46)	0,46	(45)	≤ 0,85	(40)
1996	≤ 0,12	(61)	0,40	(58)	≤ 0,28	(13)
1997	≤ 0,10	(47)	0,47	(44)	≤ 0,24	(34)

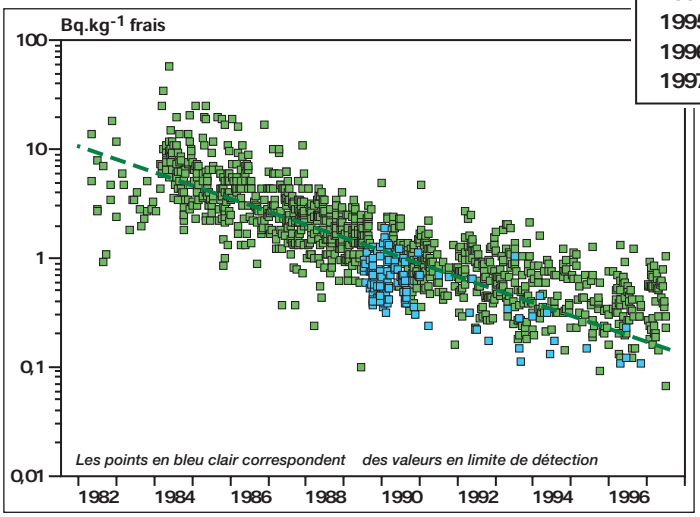


FIG. 128. - Évolution au cours du temps des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) en ^{60}Co des algues récoltées sur les panneaux immergés entre 1982 et 1997 dans le lagon de Mururoa.

Ce résultat confirme l'absence d'apport en ^{60}Co supplémentaire dans les eaux du lagon de Mururoa pendant les essais souterrains. Le ^{137}Cs et le ^{241}Am étaient présents, mais à des activités plus faibles. Ces résultats doivent cependant être considérés avec précaution, car le dispositif de panneaux immergés favorisait également le dépôt des particules sédimentaires en suspension. L'activité massique des radionucléides mesurés intégrait celle des algues, mais aussi celle des matières en suspension ce qui peut expliquer l'importance de la variabilité des activités mesurées pour une même année.

IV.6.2.2 - PLANCTON

Le ^{60}Co, le ^{238}Pu et le $^{239+240}Pu$ ont régulièrement été mesurés dans les échantillons de plancton. L'évolution annuelle de l'activité massique moyenne du ^{60}Co du plancton collecté dans les eaux du lagon des deux atolls d'expérimentations est donnée à titre d'exemple (Tableau 36).

TABLEAU 36.
Évolution annuelle des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) moyennes en ^{60}Co du plancton collecté dans les lagons de Mururoa et Fangataufa entre 1970 et 1999. *Le tiret signale l'absence de résultat.*

Année	LAGON DE MURUROA			LAGON DE FANGATAUFA		
	Nombre de prélèvements	Activité moyenne	Activité maximale	*Nombre de prélèvements*	Activité moyenne	Activité maximale
1970	*58*	205	960	-	-	-
1971	*19*	296	620	-	-	-
1972	*18*	222	740	-	-	-
1973	*9*	112	180	-	-	-
1974	*7*	152	400	-	-	-
1975	*15*	53	100	*19*	291	1 100
1976	*92*	53	210	*14*	351	590
1977	*238*	19	77	*8*	248	590
1978	*323*	31	140	*6*	177	440
1979	*144*	21	51	*3*	180	220
1980	-	-	-	*4*	293	480
1981	-	-	-	-	-	-
1982	*1*	4,4	-	*1*	270	-
1983	*7*	4,6	9,2	-	-	-
1984	-	-	-	-	-	-
1985	-	-	-	-	-	-
1986	-	-	-	*2*	27	32
1987	*4*	1,3	1,7	-	-	-
1988	*24*	1,9	4,8	*3*	13	21
1989	*27*	2,2	17	*8*	11	28
1990	*27*	1,1	2,2	*7*	7,8	17
1991	*26*	1,3	7,6	*6*	9,5	18
1992	*12*	0,78	1,1	*2*	6,0	11
1993	*11*	0,75	2,6	*2*	1,8	2,2
1994	*12*	0,71	2,3	*1*	5,2	-
1995	*12*	0,42	1,2	*1*	2,1	-
1996	*1*	0,27	-	*43*	2,8	5,1
1997	*1*	0,54	-	-	-	-
1998	*1*	0,51	-	*1*	1,8	-
1999	*1*	0,58	-	*1*	3,4	-

La période de décroissance effective (T_e) pour le ^{60}Co a été déterminée par des ajustements linéaires sur chaque série de données et a conduit à des périodes de décroissance similaires, de l'ordre de 3 ans (Fig. 129).

Lors de la période des essais souterrains, les activités massiques en ^{60}Co fluctuaient à des niveaux très faibles, de 1 à 4 $Bq.kg^{-1}$ frais de plancton. Ces fluctuations s'expliquent par la modification saisonnière de la composition en espèces du plancton prélevé et, par conséquent, de celle des facteurs de concentration à partir de l'eau de mer. Elles peuvent également trouver leur origine dans le fait que les échantillons de plancton contiennent inévitablement des particules de sédiments en suspension. Ces éléments, étrangers au prélèvement biologique, peuvent contribuer de façon non négligeable à une surestimation de l'activité des échantillons de plancton.

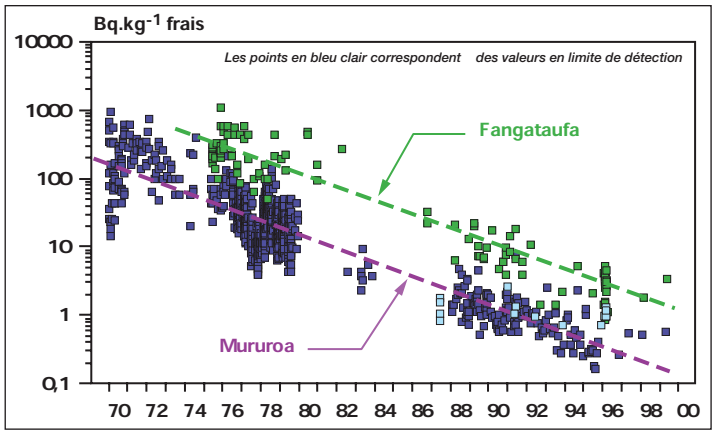


FIG. 129 - Évolution au cours du temps des activités massiques ($Bq.kg^{-1}$ frais) en ^{60}Co du plancton récolté entre 1969 et 1999 dans les lagons de Mururoa et de Fangataufa.

Les échanges lagon-océan au niveau des passes, conduisaient à la libération d'une fraction du ^{60}Co des eaux du lagon dans les eaux océaniques aux abords des atolls. Entre les passes et une limite située à 12 milles nautiques des atolls, les activités massiques en ^{60}Co du plancton étaient donc quatre fois supérieures à celles des eaux océaniques du large. Les activités massiques ont suivi une décroissance régulière au cours du temps pour atteindre à l'heure actuelle des niveaux de quelques dixièmes de becquerels par kilogramme frais (Fig. 130).

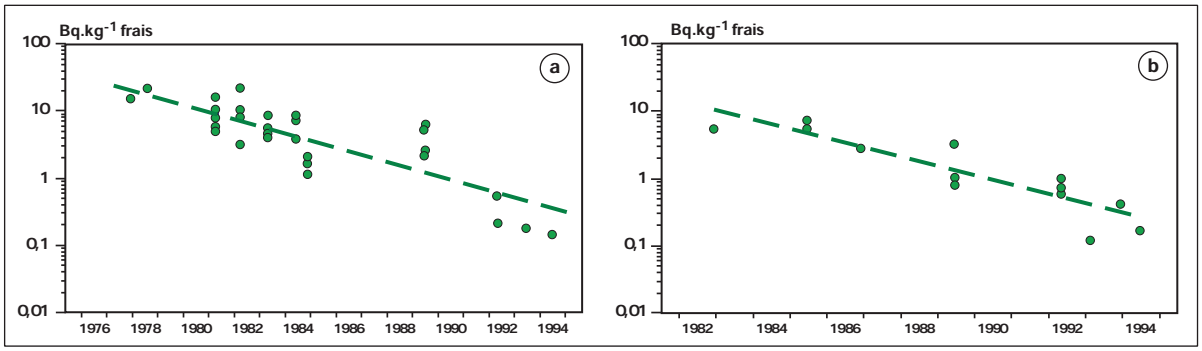


FIG. 130 - Évolution au cours du temps de l'activité massique ($Bq.kg^{-1}$ frais) en ^{60}Co du plancton collecté dans les eaux océaniques aux abords des passes des atolls de Mururoa (a) et de Fangataufa (b).

IV.6.2.3 - CORAUX

Trois radionucléides, ^{60}Co, ^{90}Sr et ^{137}Cs ont été mesurés dans les coraux prélevés dans les lagons des sites d'expérimentations.

Cobalt 60

Les activités massiques en ^{60}Co les plus élevées ont été mesurées au début de la période des essais atmosphériques. Ainsi, l'activité massique moyenne en ^{60}Co des coraux prélevés, en 1970, à Mururoa, était de l'ordre de quelques dizaines de $Bq.kg^{-1}$ frais. Les niveaux sont restés stables de la moitié des années 1970 jusqu'à la fin des années 1980. Ils ont ensuite régulièrement diminué pour atteindre une activité d'environ 1 $Bq.kg^{-1}$ frais, puis être inférieurs aux limites de détection pour une majorité d'échantillons (Fig. 131).

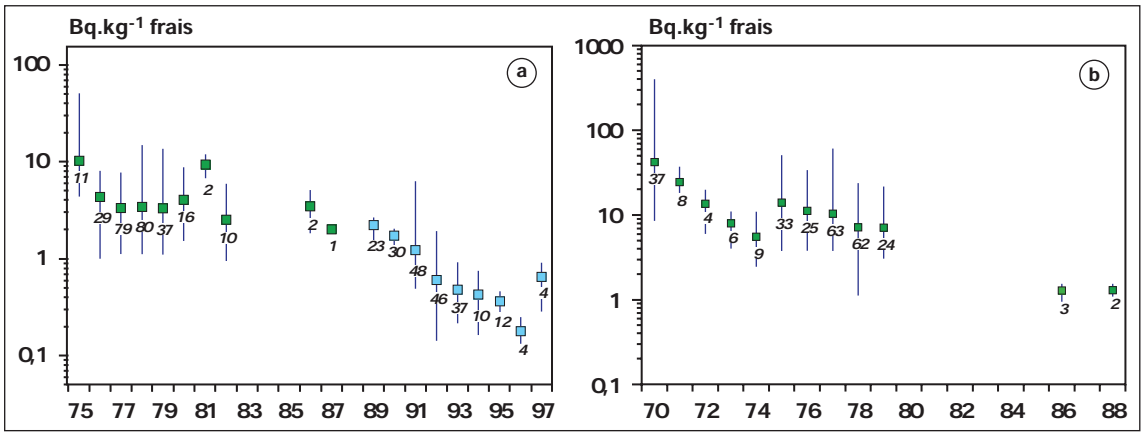


FIG. 131. - Évolution des activités massiques ($Bq.kg^{-1}$ frais) du ^{60}Co du corail du genre *Fungia* (a) et des autres espèces de coraux (b), récoltés entre 1970 et 1997, dans le lagon de Mururoa. *Le nombre de résultats de mesure, utilisés pour le calcul de la moyenne, est donné sous chacun des points de la courbe.*

La distribution géographique de l'activité massique en ^{60}Co des coraux du genre *Fungia* montre l'hétérogénéité spatiale des niveaux observés dans le lagon de Mururoa. Les activités massiques les plus élevées, de l'ordre de 50 $Bq.kg^{-1}$ frais en 1975, ont été localisées dans le secteur Ouest du lagon, en particulier au droit du point Dindon où ont eu lieu les deux essais sur barge de 1966. En 1978, les moyennes calculées par secteur à partir de 80 échantillons de *Fungia*, récoltés sur l'ensemble du lagon de Mururoa, ont confirmé cette hétérogénéité spatiale (Fig. 132).

L'activité massique en ^{60}Co des coraux du lagon de Fangataufa était généralement supérieure à celle observée à Mururoa. De l'ordre de plusieurs centaines de $Bq.kg^{-1}$ frais en 1967, elle a diminué régulièrement jusqu'en 1996, pour atteindre quelques dixièmes de $Bq.kg^{-1}$ frais. La période de décroissance effective était d'environ 3 ans (Fig. 133).

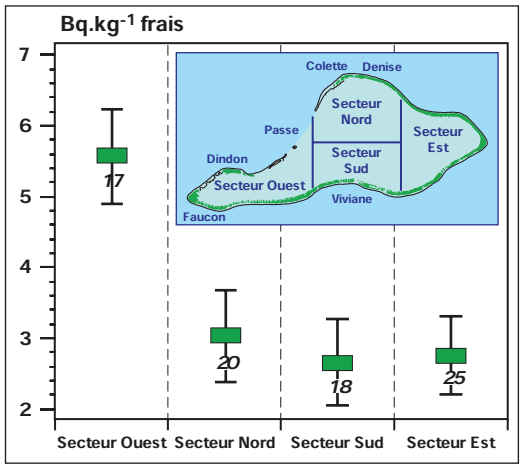


FIG. 132. - Cartographie des activités massiques minimales, moyennes et maximales ($Bq.kg^{-1}$ frais) du ^{60}Co des coraux du genre *Fungia*, récoltés en 1978, dans les différents secteurs du lagon de Mururoa. *Le nombre de résultats de mesure utilisés pour le calcul de la moyenne et pour représenter l'amplitude est donné sous chaque secteur.*

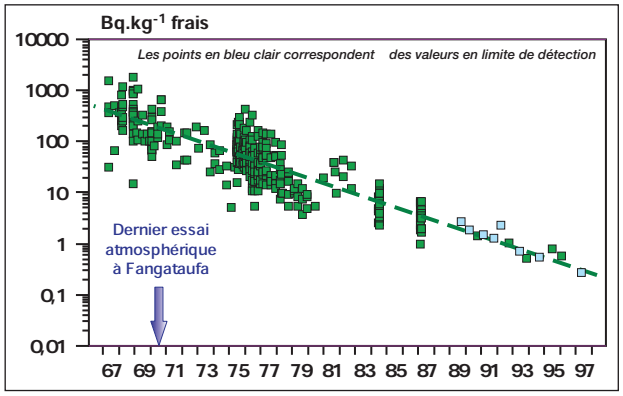


FIG. 133. - Évolution des activités massiques moyennes (Bq.kg^{-1} frais) en ^{60}Co des coraux, récoltés entre 1967 et 1997, dans le lagon de Fangataufa..

Césium 137 et strontium 90

Le ^{137}Cs a rarement été détecté dans les échantillons de coraux prélevés dans les lagons de Mururoa et de Fangataufa. Les activités massiques en ^{137}Cs supérieures à la limite de détection se situaient entre 0,93 et 9,2 Bq.kg^{-1} frais à Mururoa (9 résultats significatifs) et entre 3,2 et 92 Bq.kg^{-1} frais à Fangataufa (5 résultats significatifs).

Durant la période des essais souterrains, plus précisément de 1976 à 1990, l'activité massique moyenne annuelle en ^{90}Sr des coraux *Fungia* prélevés à Mururoa a décru d'un facteur 10, passant de 18 à 2,2 Bq.kg^{-1} frais, pour ne plus être quantifiable à partir de 1991. L'évolution au cours du temps a été similaire pour les *Fungia* du lagon de Fangataufa. L'activité massique moyenne annuelle du ^{90}Sr y était de 180 Bq.kg^{-1} frais en 1968 et de 0,78 Bq.kg^{-1} frais en 1996.

IV.6.2.4 - MOLLUSQUES

Trois radionucléides, ^{60}Co, ^{90}Sr et ^{137}Cs ont été mesurés dans les différentes espèces de mollusques, *Turbo setosus* récoltés sur les platiers externes, *Tridacna maxima* et *Trochus niloticus* prélevés dans les lagons.

Cobalt 60

Au niveau du platier externe, le mollusque *Turbo setosus* a fait l'objet d'une surveillance régulière, à partir de 1968, pour Fangataufa et de 1969 pour Mururoa. Les activités massiques étaient plus élevées dans la phase initiale des essais atmosphériques, puis ont décru au cours du temps. Ainsi, à Fangataufa, les activités massiques en ^{60}Co des viscères ont diminué, passant de 400 Bq.kg^{-1} frais, en 1968, à quelques becquerels par kilogramme frais actuellement.

De même, à Mururoa, l'activité massique de *Turbo setosus* a décru de quelques dizaines de Bq.kg^{-1} frais en 1969, à quelques dixièmes de Bq.kg^{-1} frais en 1993 (Fig. 134). La période de décroissance effective variait entre 3 et 4 ans en fonction des secteurs.

La cartographie des activités massiques en ^{60}Co a montré une hétérogénéité géographique sur les deux atolls. À Fangataufa, les niveaux les plus élevés ont été mis en évidence dans le secteur Nord de l'atoll, à proximité du récif immergé et de la passe, entre les zones Manchot et Empereur. Les niveaux les plus faibles se situaient à l'est, entre les zones Kilo et Écho, à l'abri des échanges océan-lagon. Les mêmes variations géographiques ont été constatées à Mururoa. L'activité massique en ^{60}Co des *Turbo setosus* au voisinage de la passe était 5 à 10 fois supérieure à celle mesurée sur les individus collectés dans les autres secteurs du récif.

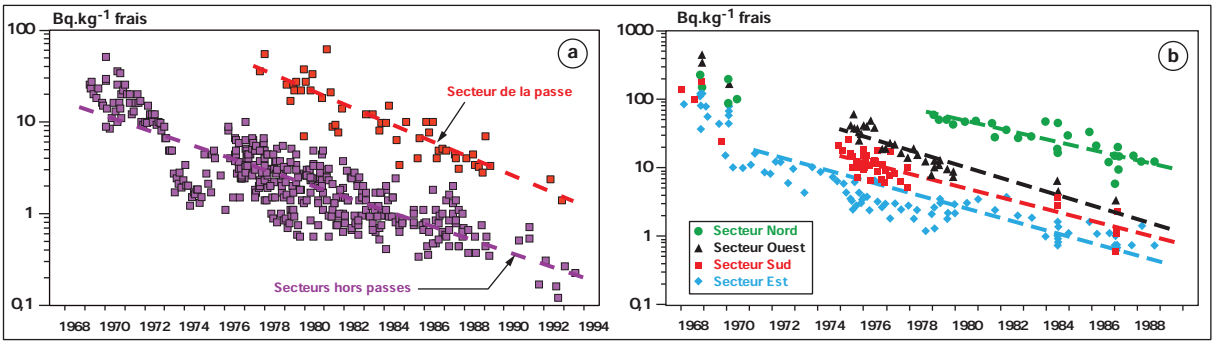


FIG. 134. - Évolution, au cours du temps, des activités massiques moyennes (Bq.kg^{-1} frais) en ^{60}Co des *Turbo setosus* récoltés entre 1967 et 1993 dans les différents secteurs des lagons de Mururoa (a) et Fangataufa (b).

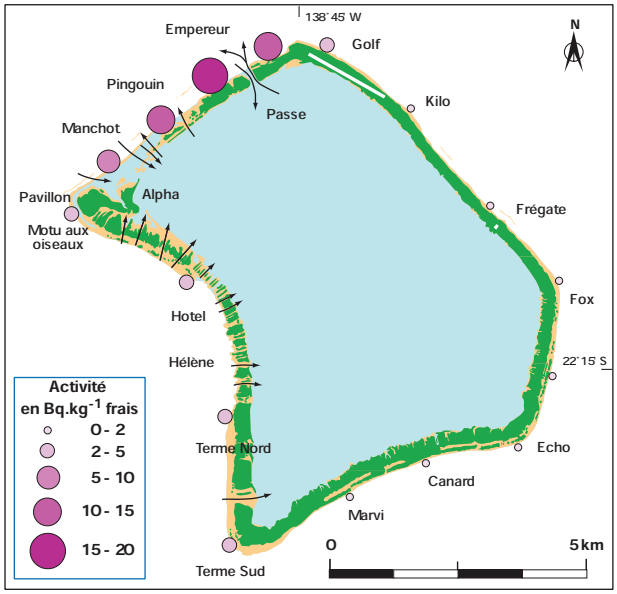


FIG. 135. - Cartographie des activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) en ^{60}Co des viscères de *Turbo setosus* collectés sur le récif extérieur de l'atoll de Fangataufa. *Les courants entrants et sortants sont indiqués par des flèches.*

La courantologie locale a permis d'expliquer les variations géographiques de l'activité massique en ^{60}Co de *Turbo setosus*. Ainsi, une étude menée à Fangataufa, en 1987, a montré que l'activité massique en ^{60}Co de ce mollusque diminuait en fonction de l'éloignement du point de prélèvement par rapport à la passe, tant en direction de l'ouest que de l'est (Fig. 135).

Pour les autres espèces, l'activité massique en ^{60}Co de la chair et de l'hépato-pancréas des bénitiers (*Tridacna maxima*) vivant dans le lagon de Mururoa a diminué d'un facteur 300 à 400, entre 1969 et 1995, avec une période de décroissance effective pour les deux organes de l'ordre de 3 ans (Fig. 136).

L'évolution au cours du temps de l'activité massique en ^{60}Co des bénitiers collectés à Fangataufa était similaire à celle observée à Mururoa et, comme pour les autres espèces faisant l'objet d'une surveillance radiologique, les niveaux mesurés y étaient supérieurs à ceux des bénitiers prélevés à Mururoa.

Le ^{60}Co était le radionucléide détecté aux niveaux les plus élevés chez les trocas (*Trochus niloticus*), avec une activité massique moyenne 5 fois plus élevée dans leurs viscères que dans leur chair. Les activités maximales ont été observées à Mururoa en 1984, soit respectivement 12 et 28 Bq.kg^{-1} frais dans la chair et les viscères. L'activité massique du ^{60}Co de la chair et des viscères de ces gastéropodes, prélevés dans le secteur Ouest du lagon de Mururoa, a diminué suivant une période de décroissance effective de l'ordre de 5 ans (Fig. 137). Les sédiments marins de cette même zone présentant les niveaux d'activité massique les plus élevés en ^{60}Co, par re-solubilisation, pouvaient enrichir l'eau de cette partie du lagon, en contact avec les mollusques. Ce phénomène d'enrichissement était probablement favorisé par le fait que les échanges entre les eaux océaniques et ce secteur de l'atoll étaient très limités.

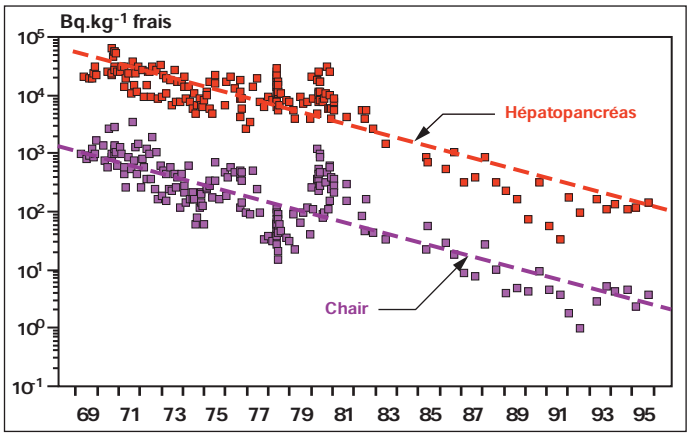


FIG. 136. - Évolution, au cours du temps, des activités massiques moyennes (Bq.kg^{-1} frais) en ^{60}Co de l'hépatopancréas et de la chair des bénitiers, récoltés entre 1969 et 1995, dans le lagon de Mururoa.

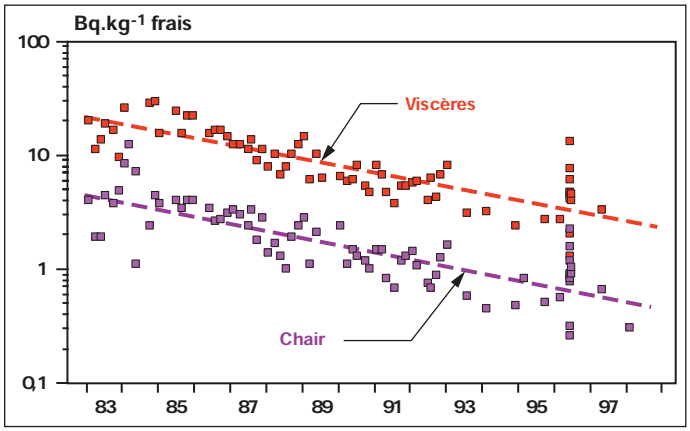


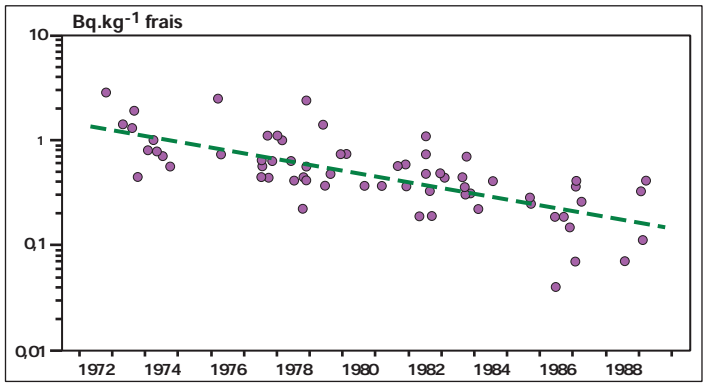
FIG. 137. - Évolution au cours du temps des activités massiques moyennes (Bq.kg^{-1} frais) en ^{60}Co de l'hépatopancréas et de la chair des trocas récoltés entre 1983 et 1998 dans le lagon de Mururoa.

Une étude menée sur une cinquantaine de prélèvements effectués sur l'ensemble du lagon de Mururoa, en 1996, a confirmé l'homogénéité de l'activité massique des trocas, dont la valeur moyenne était proche de 1 Bq.kg^{-1} frais, à l'exception de ceux de la zone Dindon. À Fangataufa, entre 1991 et 1999, l'activité en ^{60}Co de la chair de ce mollusque est passée de 9 à 2 Bq.kg^{-1} frais et celle des viscères de 37 à 24 Bq.kg^{-1} frais.

Césium 137 et strontium 90

Le ^{137}Cs est principalement associé aux tissus mous des mollusques, où il s'accumule avec un facteur de concentration (Fc) compris entre 3 et 150, c'est-à-dire 10 fois plus faible que celui du ^{60}Co. L'activité massique du ^{137}Cs dans les viscères d'échantillons de *Turbo setosus* collectés à Mururoa a décru selon une période effective de 5,4 ans, passant de quelques Bq.kg^{-1} frais en 1972, à quelques dixièmes de Bq.kg^{-1} frais en 1988 (Fig. 138). À partir de cette date, ce radionucléide n'était plus quantifiable car les activités étaient inférieures aux limites de détection des appareils de mesure utilisés pour la surveillance à cette époque.

Les activités massiques du ^{137}Cs et du ^{90}Sr étaient inférieures de plus d'un ordre de grandeur, à celles du ^{60}Co. En 1968, à Fangataufa, les valeurs maximales en ^{137}Cs étaient de 150 Bq.kg^{-1} frais de chair et en 1977 de 4 Bq.kg^{-1} frais en ^{90}Sr, dans l'hépatopancréas.



Les activités massiques de ces deux radionucléides ont ensuite diminué au cours du temps, suivant la même tendance que celle observée sur les mollusques prélevés à Mururoa.

FIG. 138. - Évolution, au cours du temps de l'activité massique (Bq.kg^{-1} frais) en ^{137}Cs des viscères des turbos collectés entre 1972 et 1989 dans le lagon de Mururoa.

IV.6.2.5 - POISSONS HERBIVORES

^{60}Co, ^{90}Co et ^{137}Cs ont été mesurés dans les différentes espèces de poissons prélevés dans les lagons et sur les pentes externes des atolls d'expérimentations.

Cobalt 60

En 1968, les activités massiques en ^{60}Co des poissons chirurgiens et perroquets éviscérés vivant sur la partie externe du récif ont atteint quelques dizaines de Bq.kg^{-1} frais. Par la suite, l'activité massique a décru au cours du temps et aucun apport d'activité n'a été mis en évidence pendant la période des essais souterrains (Fig. 139).

La moyenne annuelle de l'activité massique de ces mêmes poissons herbivores, mais vivant dans le lagon de Fangataufa, a décru, pour passer de 1 500 Bq.kg^{-1} frais en 1968 (maximum de 3 700 Bq.kg^{-1} frais, minimum de 740 Bq.kg^{-1} frais), à quelques dixièmes de Bq.kg^{-1} frais en 1999 (0,79 Bq.kg^{-1} frais). L'évolution au cours du temps des activités massiques moyennes annuelles a suivi une période de décroissance effective de l'ordre de 3 ans (Fig. 140b).

À Mururoa, les niveaux d'activité massique des mêmes espèces de poissons étaient plus faibles. L'activité massique moyenne annuelle en ^{60}Co atteignait un niveau de 100 Bq.kg^{-1} frais en 1969 (maximum de 550 Bq.kg^{-1} frais en 1970) pour décroître à moins de 1 Bq.kg^{-1} frais à partir de 1988 (Fig. 140a). Sur la période

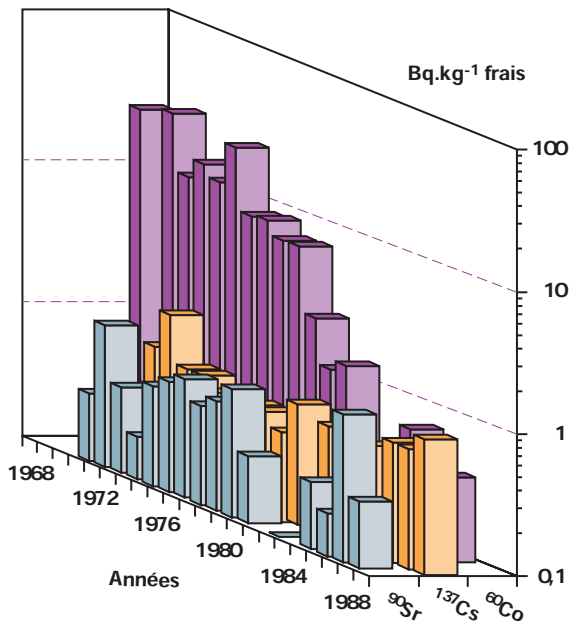


FIG. 139. - Évolution au cours du temps des activités massiques moyennes (Bq.kg^{-1} frais) en ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{90}Sr de la chair des poissons perroquets pêchés sur le récif externe de Mururoa et Fangataufa entre 1968 et 1988.

1968-1999, l'activité massique en ^{60}Co des poissons a diminué suivant une période de décroissance effective de l'ordre de 3 ans, similaire à celle calculée pour les poissons du lagon de Fangataufa.

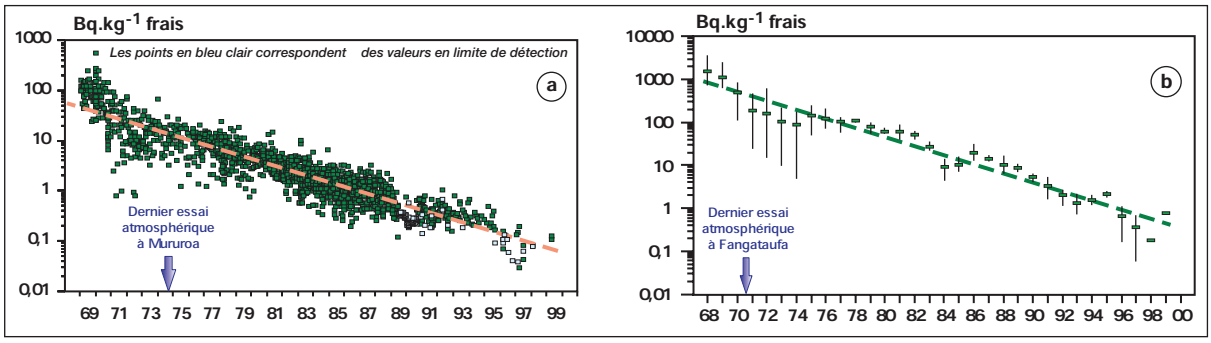


FIG. 140. - Évolution au cours du temps des activités massiques moyennes (Bq.kg^{-1} frais) en ^{60}Co de la chair des poissons perroquets et chirurgiens pêchés sur les récifs externes de Mururoa (a) et Fangataufa (b), entre 1968 et 1999. *L'amplitude entre le minimum et le maximum est indiquée autour de la moyenne pour la série de données de Fangataufa.*

La surveillance de la radioactivité des poissons du lagon de Mururoa a mis en évidence une hétérogénéité géographique, avec des niveaux d'activité massique plus élevés dans le secteur Ouest du lagon. Cette hétérogénéité est particulièrement marquée en 1983, année pour laquelle le nombre de résultats de mesure pour l'ensemble du lagon est plus important (Fig. 141).

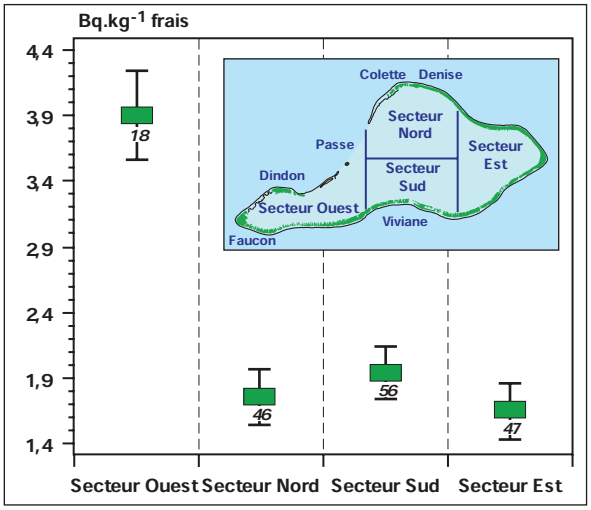


FIG. 141. - Cartographie des activités massiques moyennes (Bq.kg^{-1} frais) en ^{60}Co des poissons chirurgiens et perroquets pêchés en 1983 dans les différents secteurs du lagon de Mururoa.
Le nombre de résultats de mesure utilisés pour le calcul de la moyenne et pour représenter la dispersion des données est indiqué sous chacun de ces secteurs.

Césium 137

Depuis le début de la surveillance radiologique, les activités massiques des poissons herbivores, chirurgiens et perroquets, vivant sur la partie externe du récif, n'ont jamais dépassé quelques dixièmes de Bq.kg^{-1} frais en ^{90}Sr et ^{137}Cs.

De 1969 à 1999, sur 1 700 échantillons des mêmes espèces de poissons herbivores, prélevés cette fois dans le lagon de Mururoa, 1 500 présentaient des activités massiques en ^{137}Cs supérieures à la limite de détection des équipements. L'analyse des données montre que 93 % des activités massiques s'avéraient inférieures ou égales à 1 Bq.kg^{-1} frais, 6 % étaient comprises entre 1 et 5 Bq.kg^{-1} frais et 1 % étaient supérieures à 5 Bq.kg^{-1} frais.

Les activités les plus élevées ont été observées entre 1969 et 1970 et atteignaient quelques dizaines de Bq.kg^{-1} frais, avec un maximum de 33 Bq.kg^{-1} frais atteint en 1970 (Fig. 142a).

De 1966 à 1973, l'évolution dans le temps des activités massiques en ^{137}Cs a suivi une décroissance rapide des niveaux d'activité, passant de 30 Bq.kg^{-1} à moins de 1 Bq.kg^{-1} frais. Dès 1974, à l'arrêt des essais atmosphériques, l'activité en ^{137}Cs ne représentait plus, en moyenne, que quelques dixièmes de Bq.kg^{-1} frais. Elle a ensuite décru lentement avec une période de décroissance effective de 13 ans, pour atteindre le niveau représentatif des retombées mondiales en 1999.

L'activité massique en ^{137}Cs des poissons prélevés dans le lagon de Fangataufa, entre 1968 et 1999, a suivi une évolution similaire à celle observée à Mururoa (Fig. 142b). En 1968, elle était de l'ordre de 20 Bq.kg^{-1} frais, puis elle a diminué assez rapidement jusqu'en 1974 où elle a atteint un niveau moyen de l'ordre de 2 Bq.kg^{-1} frais. En 1999, l'activité moyenne des poissons chirurgiens collectés sur l'ensemble du lagon de Fangataufa était de 0,28 Bq.kg^{-1} frais. La période de décroissance effective du ^{137}Cs, de 1975 à nos jours, est d'environ 12 ans, à rapprocher de celle de 13 ans observée sur les poissons du lagon de Mururoa.

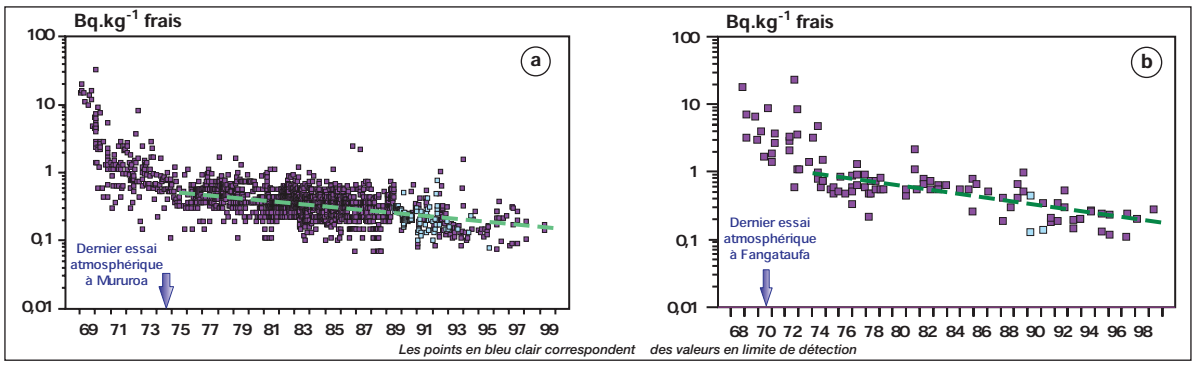


FIG. 142. - Évolution au cours du temps de l'activité massique (Bq.kg^{-1} frais) en ^{137}Cs des poissons chirurgiens et perroquets éviscérés pêchés entre 1968 et 1999 dans les lagons de Mururoa (a) et de Fangataufa (b).

IV.6.2.6 - POISSONS CARNIVORES

Cobalt 60

Le ^{60}Co était couramment détecté dans les échantillons de sumulets, poissons carnivores, prélevés à Fangataufa (Fig. 143). L'activité massique moyenne annuelle a diminué progressivement de 1 000 Bq.kg^{-1} frais en 1968 (maximum : 2 000 Bq.kg^{-1} frais) à 0,4 Bq.kg^{-1} frais en 1996.

À Mururoa où les niveaux d'activité étaient plus faibles, l'activité massique moyenne annuelle a évolué de 150 Bq.kg^{-1} frais en 1969 à moins de 1 Bq.kg^{-1} frais après 1985, en passant par un maximum de 340 Bq.kg^{-1} frais en 1970. Actuellement, l'activité massique dans la chair de ces poissons est de quelques centièmes de Bq.kg^{-1} frais.

La diminution de l'activité massique en ^{60}Co des sumulets prélevés dans les deux lagons a été régulière au cours du temps, avec des périodes de décroissance effective identiques de l'ordre de 3 ans.

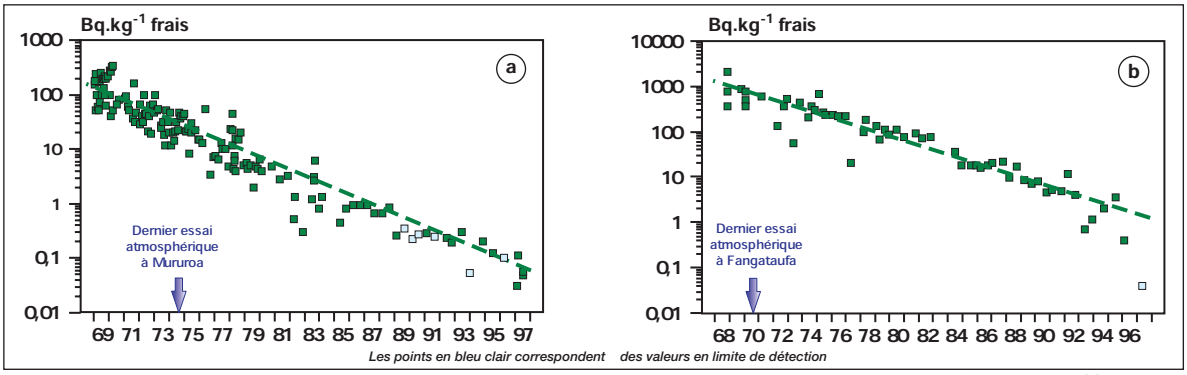


FIG. 143. - Évolution, au cours du temps, des activités massiques moyennes (Bq.kg^{-1} frais) en ^{60}Co de la chair des sumulets pêchés, entre 1968 et 1997, dans les lagons de Mururoa (a) et Fangataufa (b).

Pour les autres espèces de poissons carnivores faisant l'objet d'une surveillance radiologique, comme les mérous, les activités spécifiques en ^{60}Co étaient plus faibles à Mururoa qu'à Fangataufa. L'activité moyenne annuelle du ^{60}Co a décru de 30 Bq.kg^{-1} frais, en 1968 (activité maximale proche de 100 Bq.kg^{-1} frais) à quelques dixièmes de Bq.kg^{-1} frais en 1988 (0,26 Bq.kg^{-1} frais). De 1989 à nos jours, l'activité massique en ^{60}Co s'est presque toujours située en dessous de la limite de détection des appareils de mesure (Fig. 144). Les trois valeurs significatives obtenues en 1994, 1997 et 1998 en utilisant des protocoles spécifiques à la mesure de très faibles niveaux d'activité s'élevaient respectivement, à 0,079, 0,021 et 0,038 Bq.kg^{-1} frais.

Dans le lagon de Fangataufa, les activités massiques moyennes annuelles en ^{60}Co dans les mérous éviscérés ont décru régulièrement, passant de 1 000 Bq.kg^{-1} frais en 1968 (activité maximale de 8 800 Bq.kg^{-1} frais) à 0,056 Bq.kg^{-1} frais en 1999. Dans les deux lagons, la période de décroissance effective du ^{60}Co dans la chair des mérous était de l'ordre de 3 ans, comme pour les autres poissons.

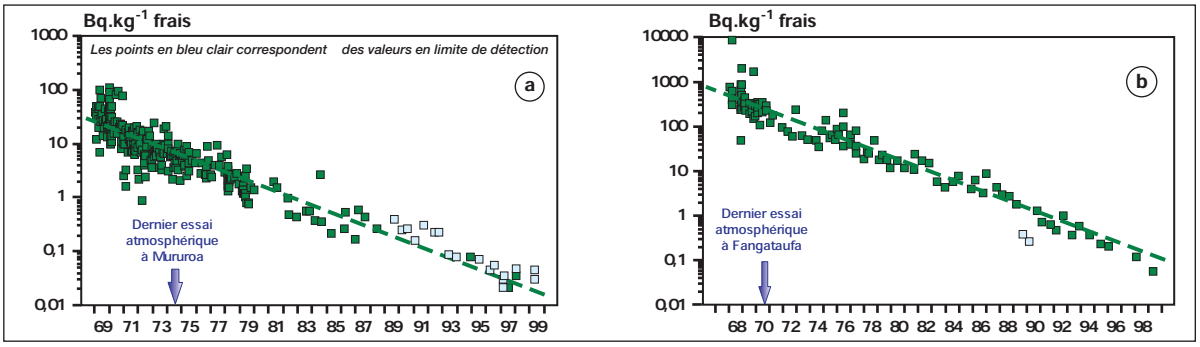


FIG. 144. - Évolution, au cours du temps, des activités massiques moyennes (Bq.kg^{-1} frais) en ^{60}Co de la chair des mérous pêchés, entre 1968 et 1999, dans les lagons de Mururoa (a) et Fangataufa (b).

Césium 137

Sur les 215 échantillons de poissons carnivores du genre *Mulloidichthys* (sumulet) prélevés entre 1969 et 1997 dans le lagon de Mururoa, 103 avaient une activité massique en ^{137}Cs supérieure à la limite de détection. L'évolution au cours du temps de l'activité massique du ^{137}Cs a suivi

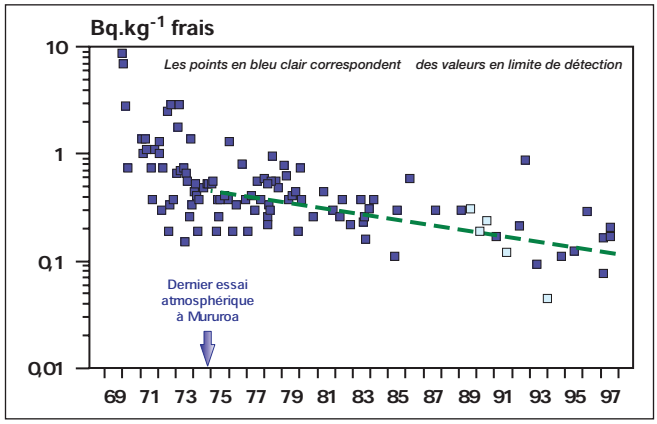


FIG. 145. - Évolution au cours du temps de l'activité massique (Bq.kg^{-1} frais) en ^{137}Cs des surmulets éviscérés pêchés dans le lagon de Mururoa, entre 1969 et 1997.

une décroissance rapide jusqu'en 1974, la période effective étant alors de 1,7 an, avant de décroître plus lentement jusqu'à nos jours avec une période effective de l'ordre de 13 ans (Fig. 145). De 1974 à nos jours, l'activité massique en ^{137}Cs de la chair des surmulets a fluctué entre 0,1 et 1 Bq.kg^{-1} frais, à un niveau très proche de la limite de détection des appareils de mesure de l'époque. Aujourd'hui, elle est inférieure à 0,1 Bq.kg^{-1} frais.

Dans le lagon de Fangataufa, les 20 échantillons prélevés entre 1972 et 1997 présentaient des activités massiques en ^{137}Cs comprises entre 1 et 0,1 Bq.kg^{-1} frais, à l'exception de la valeur maximale de 21 Bq.kg^{-1} frais, mesurée en 1975.

Le ^{137}Cs a été régulièrement détecté dans la chair des autres espèces carnivores prélevées sur les deux atolls. En 1968, les activités massiques moyennes annuelles des mérous à Mururoa et à Fangataufa étaient respectivement de l'ordre de 20 et de 100 Bq.kg^{-1} frais (Fig. 146).

Elles ont ensuite diminué rapidement pour atteindre environ 1 Bq.kg^{-1} frais peu après l'arrêt des essais atmosphériques, puis beaucoup plus lentement, jusqu'à quelques dixièmes de Bq.kg^{-1} frais, soit le niveau représentatif du bruit de fond dû aux retombées mondiales, très proche de la limite de détection des appareils de mesure.

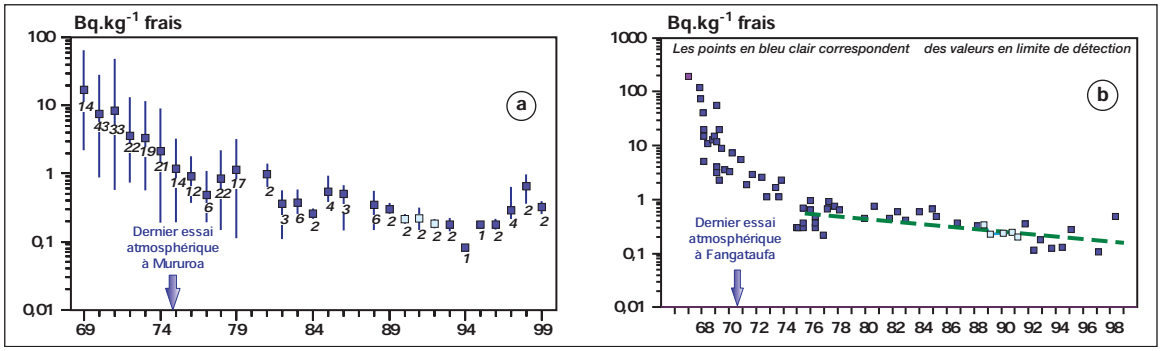


FIG. 146. - Évolution, au cours du temps, de l'activité massique (Bq.kg^{-1} frais) en ^{137}Cs des mérous pêchés, entre 1967 et 1999, dans les lagons de Mururoa (a) et de Fangataufa (b). *Le nombre de résultats de mesures utilisés pour le calcul de la moyenne et pour représenter l'amplitude des données est précisé pour Mururoa.*

IV.6.2.7 - HOLOTHURIES

Parmi les radionucléides de période supérieure à cinq ans, le ^{60}Co était celui présentant les activités massiques les plus élevées dans les téguments des holothuries prélevées à Mururoa et à Fangataufa.

À Mururoa, l'activité massique moyenne annuelle en ^{60}Co, de l'ordre d'une dizaine de $Bq.kg^{-1}$ frais en 1976, a régulièrement décru pour atteindre quelques centièmes de $Bq.kg^{-1}$ frais en 1997 (Fig. 147). La période de décroissance effective en ^{60}Co, d'environ 3 ans, est analogue à celle relevée pour la plupart des espèces. À partir de 1990, le nombre de valeurs en limite de détection est de plus en plus important.

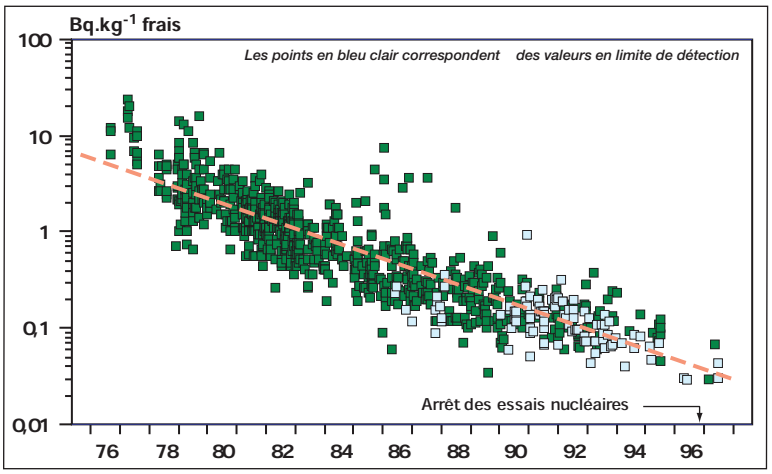


FIG. 147. – Évolution au cours du temps de l'activité en ^{60}Co du tégument de l'holothurie noire (*Holothuria atra*) dans le lagon de Mururoa.

Dans le lagon de Fangataufa, pour lequel des mesures plus anciennes sont disponibles, mais en moins grand nombre, les niveaux d'activité du ^{60}Co sont plus élevés qu'à Mururoa (Tableau 37). Entre 1967 et 1997, l'activité massique moyenne annuelle en ^{60}Co passe de quelques milliers de $Bq.kg^{-1}$ frais à des valeurs très proches de la limite de détection des appareils de mesure (0,015 $Bq.kg^{-1}$ frais en 1997). Par rapport au sédiment au contact duquel l'holothurie vit et se nourrit, le facteur de concentration du cobalt dans les téguments est voisin de 6.

TABLEAU 37.
Activités massiques ($Bq.kg^{-1}$ frais) moyennes, annuelles et maximales en ^{60}Co des échantillons de téguments d'holothuries noires prélevés dans le lagon de Fangataufa entre 1967 et 1997.

Année	*Nombre de mesures*	Activité moyenne	Activité maximale	Année	*Nombre de mesures*	Activité moyenne	Activité maximale
1967	*11*	3 982	2 500	1983	*1*	18	18
1969	*6*	848	1 300	1985	*2*	1,1	2,1
1971	*2*	495	550	1987	*1*	0,41	0,41
1973	*2*	270	320	1989	*2*	1,3	1,7
1975	*2*	96	160	1991	*1*	2,7	2,7
1977	*1*	100	100	1993	*2*	1,2	1,42
1979	*1*	18	18	1995	*1*	0,32	0,32
1980	*2*	55	66	1997	*1*	0,015	0,015

L'activité massique des autres radionucléides de période supérieure à cinq ans, ^{137}Cs, ^{90}Sr et ^{155}Eu chez les holothuries était très faible, tant à Mururoa qu'à Fangataufa (Tableau 38). Ainsi, sur plusieurs centaines d'échantillons collectés dans le lagon de Mururoa, la proportion de mesures inférieures aux limites de détection est de 74 % et 87 %, respectivement pour le ^{137}Cs et le ^{155}Eu.

Radionucléide	Lagon de Mururoa		Lagon de Fangataufa	
	Date	Activité maximale	Date	Activité maximale
^{137}Cs	08.08.89	8,5	04.03.69	21
^{90}Sr	04.02.82	0,67	01.06.74	3,2
^{155}Eu	08.04.86	0,85	18.02.91	0,64

TABLEAU 38.
Activités massiques maximales (Bq.kg^{-1} frais) en ^{137}Cs, ^{90}Sr et ^{155}Eu d'échantillons de téguments d'holothuries noires prélevés dans les lagons de Mururoa et Fangataufa.

IV.6.3 - ISOTOPES DU PLUTONIUM

Le facteur de concentration Fc du plutonium dans les organismes marins décroît des échelons primaires vers les échelons supérieurs des chaînes trophiques (cf. Chapitre II). Ainsi, les facteurs de concentration du plutonium relevés dans la littérature scientifique sont de l'ordre de 20 000 pour les algues, de 1 000 pour les mollusques et de 10 à 100 pour les poissons.

IV.6.3.1 - ALGUES BENTHIQUES

Les quantités d'algues benthiques naturellement présentes étant insuffisantes pour la mesure des isotopes du plutonium, des panneaux immergés favorisant la croissance des algues ont été mis en place à partir de 1982. Dès lors, la masse des échantillons collectés a permis la mesure en routine des ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$ (Tableau 39).

Pour la période 1982-1997, les activités massiques ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$ ont suivi une tendance globale à la baisse, ponctuées de fortes variations. Cependant, comme cela a déjà été souligné, ces valeurs sont à considérer avec précaution, compte tenu des biais d'échantillonnage possibles. En effet, le dispositif de panneaux immergés favorisait le dépôt des particules sédimentaires en suspension. Par conséquent, l'activité massique des radionucléides mesurés intégrait celle des algues, mais aussi celle des matières en suspension ce qui peut expliquer la variabilité annuelle des activités mesurées.

TABLEAU 39.
Activités masiques (Bq.kg^{-1} frais) moyennes annuelles des isotopes ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$ des algues benthiques prélevées sur les dispositifs de panneaux immergés installés entre 1982 et 1997, dans le lagon de Mururoa. *Le chiffre entre parenthèses correspond au nombre d'échantillons et le tiret signale l'absence de résultat.*

Année	Radionucléides				Année	Radionucléides			
	^{238}Pu		$^{239+240}Pu$			^{238}Pu		$^{239+240}Pu$	
	Act.	*(Nb.)*	Act.	*(Nb.)*		Act.	*(Nb.)*	Act.	*(Nb.)*
1982	2,0	*(9)*	32	*(10)*	1990	0,76	*(140)*	5,9	*(140)*
1983	-	-	1,3	*(2)*	1991	1,0	*(74)*	6,4	*(74)*
1984	15	*(47)*	73	*(47)*	1992	0,85	*(89)*	9,3	*(89)*
1985	13	*(24)*	73	*(24)*	1993	1,4	*(91)*	14	*(91)*
1986	7,8	*(48)*	217	*(48)*	1994	1,3	*(43)*	9,2	*(43)*
1987	3,3	*(119)*	72	*(120)*	1995	1,3	*(46)*	11	*(46)*
1988	2,3	*(140)*	26	*(142)*	1996	1,4	*(53)*	27	*(53)*
1989	3,2	*(93)*	11	*(93)*	1997	1,2	*(45)*	7,5	*(46)*

IV.6.3.2 - CORAUX

La mesure des isotopes ^{238}Pu et $^{239+240}$Pu sur les coraux du genre *Fungia* a débuté sur une base régulière en 1977, à partir d'échantillons prélevés à Mururoa, pour être étendue en 1987 aux genres *Lobophyllia*, *Pocillopora*, *Acropora* et *Porites* présents dans les lagons des deux atolls d'expérimentations.

L'activité massique en $^{239+240}$Pu des échantillons de *Fungia* collectés à Mururoa, entre 1977 et 1997, était comprise entre 0,021 à 960 Bq.kg^{-1} frais. Durant cette période, l'activité massique moyenne, tous secteurs confondus, était de 8,9 Bq.kg^{-1} frais. Les activités en ^{238}Pu se situaient entre 0,04 et 40 Bq.kg^{-1} frais, avec une moyenne de 1,3 Bq.kg^{-1} frais. Cependant, 61 % des 371 mesures de ^{238}Pu étaient inférieures à la limite de détection.

La variabilité des activités massiques en $^{239+240}$Pu des échantillons de *Fungia*, prélevés à Mururoa au cours d'une même année, traduisait une hétérogénéité géographique. Celle-ci a été cartographiée en utilisant les valeurs des activités maximales observées aux différentes stations de prélèvement (Fig. 148). Les niveaux d'activité les plus élevés, entre 400 et 960 Bq.kg^{-1} frais, correspondaient aux échantillons prélevés dans le secteur Nord, au droit de la zone Colette, où ont été réalisés les essais de sécurité.

En 1986 et 1987, les activités massiques les plus élevées des autres genres de coraux étaient également observées dans le secteur Nord : 7 400 Bq.kg^{-1} frais pour *Acropora*, 2 500 et 1 100 Bq.kg^{-1} frais pour *Pocillopora* et 740 Bq.kg^{-1} frais pour *Lobophyllia*.

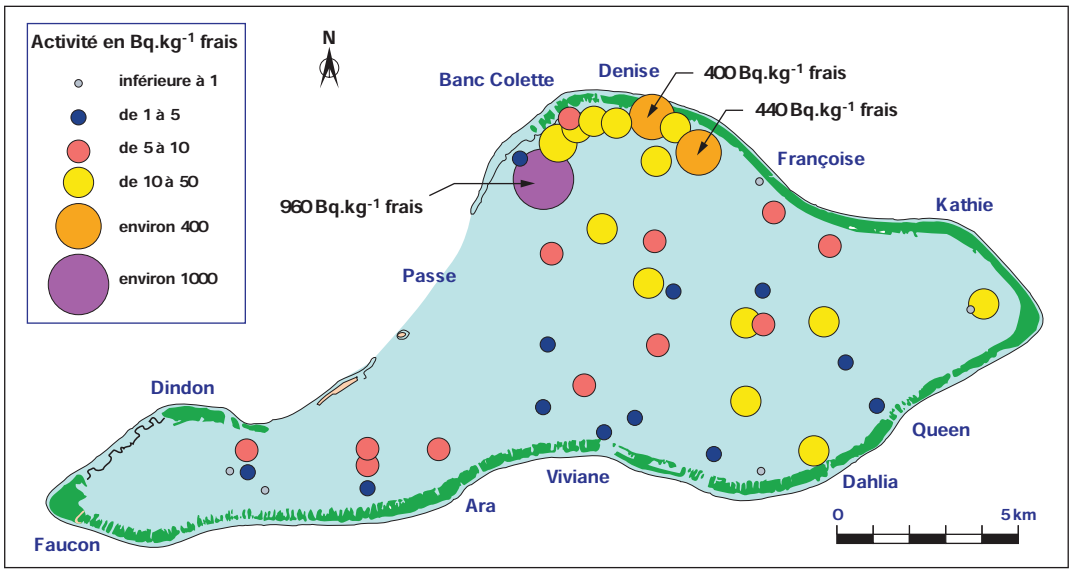


FIG. 148. - Activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) en $^{239+240}$Pu des *Fungia* prélevés dans le lagon de Mururoa.

De 1987 à 1997, les activités massiques du $^{239+240}$Pu sur les 29 échantillons des différents genres de coraux prélevés à Fangataufa variaient de 0,5 à 12 Bq.kg^{-1} frais (moyenne : 4,1 Bq.kg^{-1} frais). Les 28 valeurs significatives des activités massiques en ^{238}Pu étaient comprises entre 0,18 et 4,5 Bq.kg^{-1} frais, avec une moyenne de 1,4 Bq.kg^{-1} frais.

IV.6.3.3 - MOLLUSQUES

La surveillance radiologique des mollusques filtreurs concernait les isotopes ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$, systématiquement mesurés, entre 1976 et 1995, dans la chair, l'hépatopancréas ou les viscères des bénitiers et des nacres des lagons de Mururoa et de Fangataufa. Les activités massiques avaient une hétérogénéité spatiale marquée, mais une relative stabilité au cours du temps pour chaque secteur de prélèvement.

Les activités massiques en $^{239+240}Pu$ des bénitiers collectés à Mururoa variaient entre 0,6 et 29 $Bq.kg^{-1}$ frais, pour la chair et entre 0,5 et 370 $Bq.kg^{-1}$ frais dans l'hépatopancréas. Les activités massiques du ^{238}Pu dans les deux fractions se situaient entre 0,1 et 10 $Bq.kg^{-1}$ frais (Tableau 40).

TABLEAU 40.
Activité massique moyenne ($Bq.kg^{-1}$ frais) des échantillons de chair et d'hépatopancréas des bénitiers prélevés entre 1976 et 1995 dans les différents secteurs de l'atoll de Mururoa.

Zones	^{238}Pu				$^{239+240}Pu$			
	Chair		Hépatopancréas		Chair		Hépatopancréas	
	Nombre de détections	Activité moyenne	*Nombre de détections*	Activité moyenne	*Nombre de mesures significatives*	Activité moyenne	*Nombre de mesures significatives*	Activité moyenne
Nord	*3*	4,4	*3*	3,4	*3*	15	*3*	3,4
Est	*14*	0,10	*10*	0,17	*15*	0,57	*11*	0,17
Ouest	*10*	0,48	*2*	1,3	*11*	4,6	*2*	1,3

À Fangataufa, entre 1979 et 1988, l'activité massique en $^{239+240}Pu$ des bénitiers variait entre 0,13 et 2,7 $Bq.kg^{-1}$ frais pour la chair et entre 0,18 et 2,3 $Bq.kg^{-1}$ frais pour l'hépatopancréas.

L'activité massique en $^{239+240}Pu$ des mollusques brouteurs comme le turbo était à des niveaux faibles, avec des activités massiques maximales de 2 $Bq.kg^{-1}$ frais. Elle dépendait de l'intensité des retombées locales durant les essais atmosphériques et des apports par les passes d'eau du lagon sur le platier externe. Ainsi, à Mururoa, les échantillons les plus marqués étaient issus des récifs des secteurs Nord (Denise) et Nord-Ouest (Dindon) situés à proximité des anciens points zéro des essais atmosphériques et de la passe (Fig. 149).

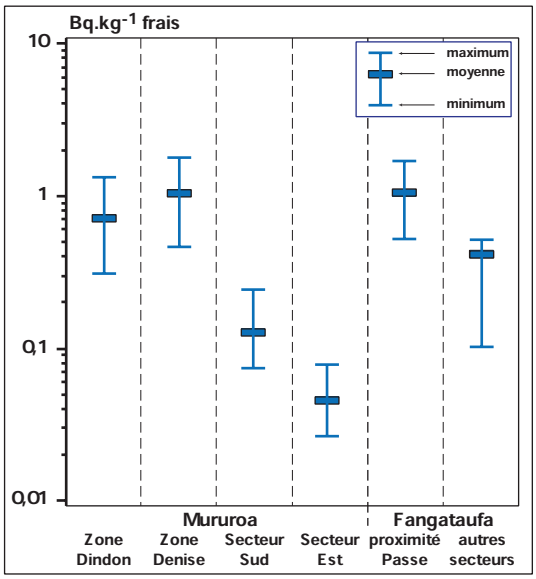


FIG. 149. - Activité massique ($Bq.kg^{-1}$ frais) en $^{239+240}Pu$ mesurée sur des échantillons de turbos prélevés de 1977 à 1993 dans les lagons de Mururoa et Fangataufa.

De même, à Fangataufa, les plus fortes activités des turbos ont été mesurées dans les secteurs Nord et Nord-Est de l'atoll, entre les zones Manchot et Kilo, de part et d'autre de la passe (Fig. 150).

Les activités massiques en $^{239+240}$Pu étaient supérieures à celles du ^{238}Pu dans les viscères de turbo prélevés sur les 2 atolls et le rapport ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu variait en moyenne de 0,2 à 0,02, en fonction de l'origine des retombées.

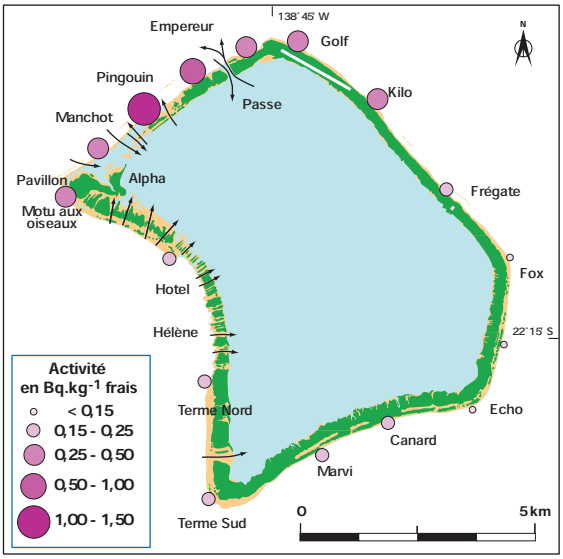


FIG. 150. - Activité massique (Bq.kg^{-1} frais) en $^{239+240}$Pu mesurée sur des échantillons de *Turbo setosus* prélevés sur le platier externe de Fangataufa (Bilan 1987). *Les flèches indiquent les courants océaniques entrants et lagonaires sortants.*

Les isotopes du plutonium ont été détectés régulièrement dans la chair et dans les viscères du troca, autre mollusque brouteur. L'activité massique des échantillons de troca issus des deux lagons étaient, en moyenne, à des niveaux 2,5 fois plus élevés dans les échantillons de viscères que dans ceux de la chair des mêmes animaux. En 1996, le bilan radiologique effectué sur 25 stations de prélèvement du lagon de Mururoa a confirmé que les activités massiques en $^{239+240}$Pu étaient sensiblement plus élevées dans les échantillons collectés dans le secteur Nord (Fig. 151). Les activités massiques en ^{238}Pu de la chair et des viscères variaient respectivement entre 0,09 et 1,4 Bq.kg^{-1} frais et entre 0,22 et 4,1 Bq.kg^{-1} frais.

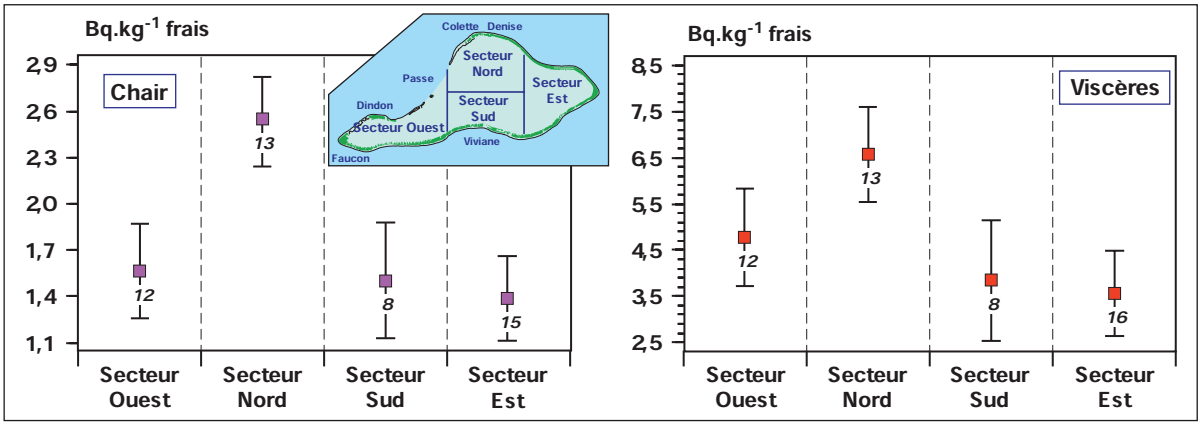


FIG. 151. - Activité massique moyenne (Bq.kg^{-1} frais) en $^{239+240}$Pu des échantillons de trocas prélevés en 1996 dans les différents secteurs du lagon de Mururoa. *L'amplitude des résultats de mesures est donnée autour de la moyenne avec le chiffre correspondant au nombre de mesures significatives.*

À Fangataufa, les activités massiques de troca étaient plus élevées qu'à Mururoa. Entre 1991 et 1999, l'activité massique en $^{239+240}$Pu des chairs et des viscères variait respectivement entre 2,1 et 5,8 Bq.kg^{-1} frais et entre 8,7 et 25 Bq.kg^{-1} frais. Les activités en ^{238}Pu variaient entre 0,83 et 2,3 Bq.kg^{-1} frais pour les échantillons de chair et entre 3,5 et 10 Bq.kg^{-1} frais pour ceux de viscères.

IV.6.3.4 - POISSONS HERBIVORES

Les activités massiques en $^{239+240}$Pu des poissons herbivores, chirurgiens et perroquets prélevés régulièrement dans les lagons étaient disponibles à partir de 1977 et à partir de 1986 pour le ^{238}Pu. De 1977 à 1999, 300 analyses de $^{239+240}$Pu ont été réalisées sur des poissons prélevés dans le lagon de Mururoa. 88 % des résultats étaient inférieurs ou égaux à 1 Bq.kg^{-1} frais, 9 % étaient compris entre 1 et 5 Bq.kg^{-1} frais et 3 % étaient supérieurs à 5 Bq.kg^{-1} frais. Dans ce lagon, la répartition géographique des niveaux d'activité en $^{239+240}$Pu apparaît hétérogène (Fig. 152).

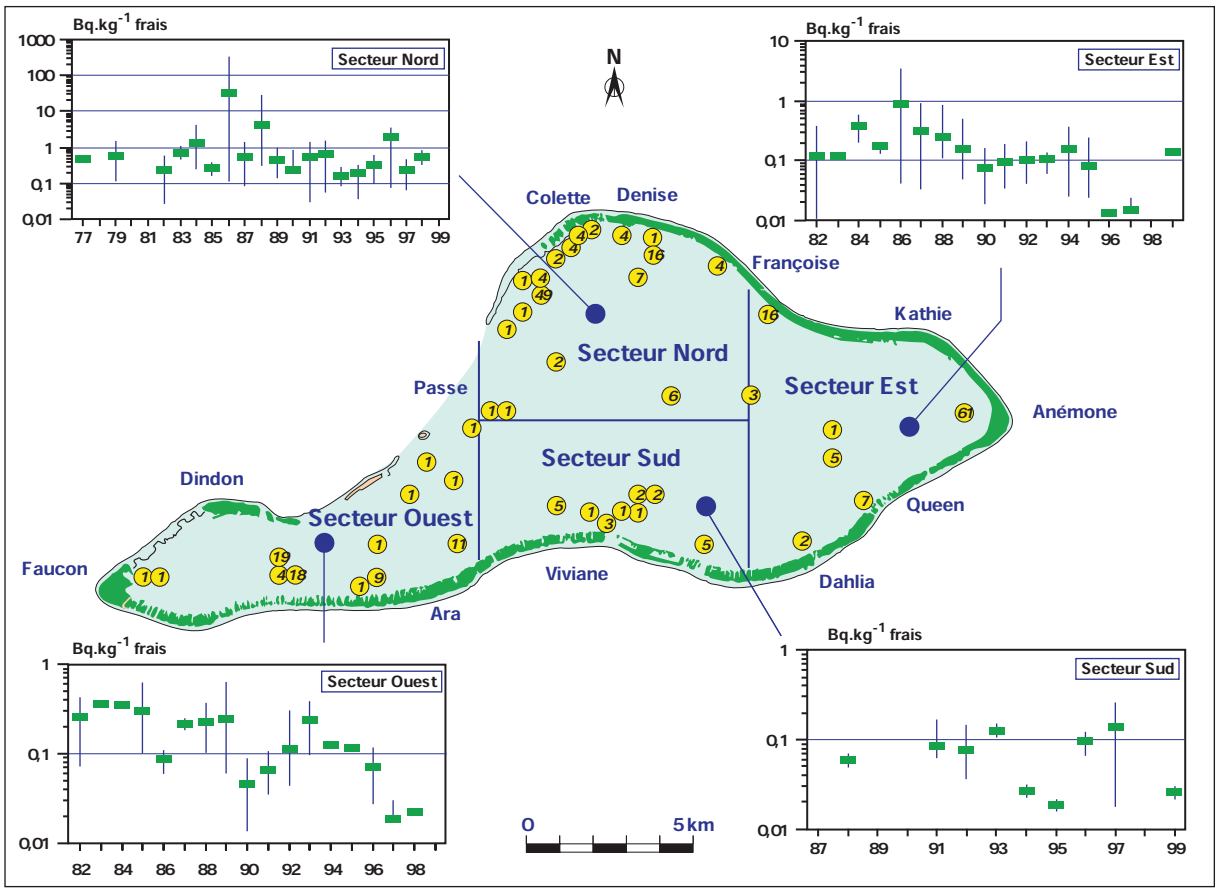


FIG. 152. - Activité massique moyenne (Bq.kg^{-1} frais) en $^{239+240}$Pu des poissons chirurgiens et perroquets prélevés entre 1977 et 1999 dans les différents secteurs du lagon de Mururoa. *L'amplitude des résultats de mesure est donnée autour de la moyenne avec le chiffre correspondant au nombre de mesures significatives.*

Pendant cette période, les activités massiques moyennes annuelles étaient plus élevées dans le secteur Nord (4,9 Bq.kg^{-1} frais) que dans les secteurs Est (0,17 Bq.kg^{-1} frais), Sud (0,07 Bq.kg^{-1} frais) et Ouest (0,14 Bq.kg^{-1} frais) avec des activités maximales observées sporadiquement, en 1986 et 1987, respectivement à 340, 55, 27 et 17 Bq.kg^{-1} frais avec les valeurs les plus élevées aux abords du banc Colette et au droit de la zone Denise,

En 1986, dans le secteur Est du lagon, l'activité massique en $^{239+240}$Pu des poissons chirurgiens et perroquets a atteint un maximum de 3,7 Bq.kg^{-1} frais, avec une moyenne de 0,9 Bq.kg^{-1} frais. Le ^{238}Pu a été plus rarement décelé. Ainsi, sur les 270 échantillons soumis à analyse, 48 % des mesures obtenues ont été supérieures aux limites de détection, avec des valeurs réparties entre 0,0014 et 6,3 Bq.kg^{-1} frais.

À Fangataufa, sur les vingt-cinq mesures significatives réalisées sur les poissons herbivores prélevés entre 1986 et 1999, l'activité en $^{239+240}$Pu se situait entre 0,005 et 2,11 Bq.kg^{-1} frais, avec une moyenne de 0,24 Bq.kg^{-1} frais. Les activités massiques en ^{238}Pu variaient entre 0,015 et 1,4 Bq.kg^{-1} frais, pour une moyenne de 0,13 Bq.kg^{-1} frais, obtenue avec 22 mesures significatives.

IV.6.3.5 - POISSONS CARNIVORES

Sur les 18 mesures de $^{239+240}$Pu réalisées sur les poissons carnivores du genre *Mulloidichthys* pêchés, entre 1982 et 1997 dans les lagons de Mururoa et de Fangataufa, 13 échantillons de sumulets étaient inférieurs aux limites de détection. Les activités massiques se répartissaient entre 0,002 et 4 Bq.kg^{-1} frais, valeur maximale relevée sur des poissons prélevés dans le lagon de Mururoa en 1986. Les activités massiques moyennes sur cette période s'établissaient à 0,52 et 0,04 Bq.kg^{-1} frais respectivement à Mururoa et Fangataufa.

Sur 30 mesures de ^{238}Pu effectuées sur des poissons prélevés dans les deux lagons, 5 seulement étaient supérieures aux limites de détection, avec des activités massiques entre 0,004 et 0,74 Bq.kg^{-1} frais.

Les isotopes du plutonium ont rarement été détectés dans les échantillons de chair des différents genres de mérous prélevés. Entre 1974 et 1999, sur une trentaine de mesures de $^{239+240}$Pu effectuées sur des échantillons issus de Mururoa, les activités massiques étaient comprises entre 0,01 et 1,1 Bq.kg^{-1} frais ; cependant 30 % étaient inférieures aux limites de détection. La moyenne calculée à partir des mesures significatives était de 0,16 Bq.kg^{-1} frais. À Fangataufa, 10 mesures significatives sur les 14 réalisées présentaient des activités massiques en $^{239+240}$Pu comprises entre 0,003 et 0,14 Bq.kg^{-1} frais et une moyenne de 0,04 Bq.kg^{-1} frais.

Le ^{238}Pu a été recherché sur 23 échantillons de mérous pêchés à Mururoa. Six mesures significatives ont présenté des activités comprises entre 0,02 et 0,26 Bq.kg^{-1} frais, avec une moyenne de 0,07 Bq.kg^{-1} frais. Seules deux valeurs sont disponibles pour les mérous issus de Fangataufa : 0,008 et 0,01 Bq.kg^{-1} frais.

IV.6.3.6 - HOLOTHURIES

Depuis 1977, les isotopes ^{238}Pu et $^{239+240}$Pu ont fait l'objet d'une mesure systématique dans le tégument de l'holothurie noire (*Holothuria atra*). Ainsi, entre 1977 et 1997, les activités massiques en $^{239+240}$Pu des holothuries collectées à Mururoa présentaient une amplitude de valeurs importante, de 0,012 à 310 Bq.kg^{-1} frais. Durant cette période, l'activité massique moyenne en $^{239+240}$Pu, toutes zones confondues, était de 2 Bq.kg^{-1} frais, mais les niveaux s'avéraient significativement plus élevés dans le secteur Nord (moyenne : 5,2 Bq.kg^{-1} frais) que dans les autres secteurs (Tableau 41).

TABLEAU 41.
Activités moyennes et maximales (Bq.kg^{-1}) en $^{239+240}$Pu dans les échantillons de téguments d'holothuries noires collectées entre 1977 et 1997, dans les différents secteurs du lagon de Mururoa.

Secteur Géographique	*Nombre de mesures*	Activité moyenne	Activité maximale
Nord	*127*	5,2	310
Est	*84*	0,30	4,4
Sud	*106*	0,48	22
Ouest	*70*	0,30	5,5

Les plus fortes activités massiques, allant de 100 à 310 Bq.kg^{-1} frais, ont été relevées au voisinage du banc Colette, à proximité des *motu* où ont été réalisés des essais de sécurité (Fig. 153). Les activités moyennes des autres secteurs étaient comparables entre elles, ne dépassant pas quelques dixièmes de Bq.kg^{-1} frais.

Les activités en ^{238}Pu se situent entre 0,03 et 6,3 Bq.kg^{-1} frais (moyenne : 0,25 Bq.kg^{-1} frais). Dès 1985, 60 % des valeurs étaient inférieures à la limite de détection.

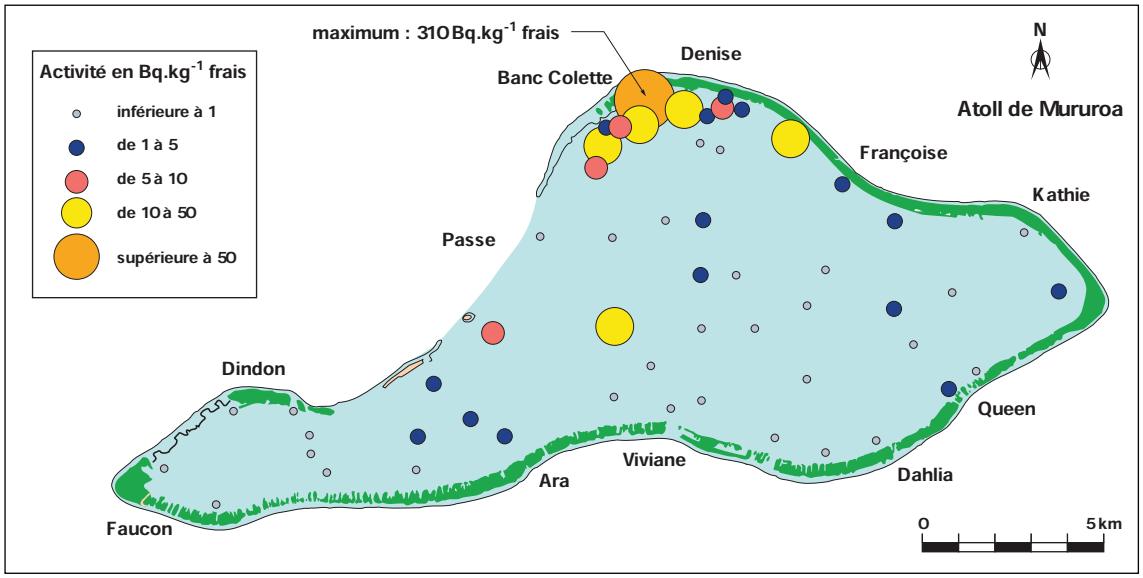


FIG. 153. - Représentation géographique de l'activité massique (Bq.kg^{-1} frais) moyenne en $^{239+240}$Pu des téguments des holothuries noires prélevées entre 1977 et 1997 dans le lagon de Mururoa.

À Fangataufa, sur 22 mesures de $^{239+240}$Pu, trois étaient en limite de détection. L'activité massique se situait entre 0,027 et 1,1 Bq.kg^{-1} frais avec une valeur moyenne de 0,31 Bq.kg^{-1} frais.

Sur les 16 mesures de ^{238}Pu réalisées, 6 étaient en limite de détection, et les activités massiques significatives variaient de 0,014 à 0,33 Bq.kg^{-1} frais, avec une moyenne de 0,13 Bq.kg^{-1} frais.

IV.7 - CONCLUSION

L'activité d'origine artificielle, mesurée au cours du temps au sein des différentes composantes de l'environnement des atolls de Mururoa et de Fangataufa, provient essentiellement des quatre essais sur barge effectués au début des essais atmosphériques, en 1966 (Aldébaran, Rigel et Sirius) et 1967 (Arcturus). Les essais atmosphériques réalisés jusqu'en 1974, en altitude sous ballon captif, n'ont contribué par la suite que très faiblement à la radioactivité de l'environnement des deux atolls. Les essais souterrains, pour leur part, ont eu un effet très limité dans le temps et localisé dans l'espace aux têtes de puits, pour un spectre de radionucléides assez réduit.

De 1966 à 1974, les activités volumiques des radionucléides présents dans l'atmosphère variaient très rapidement, au cours du temps, en fonction des essais. La surveillance radiologique des aérosols a mis en évidence une baisse très rapide de l'activité atmosphérique après chaque essai pratiqué dans l'atmosphère. Localement, pendant cette période, de brefs phénomènes de rémanence ont été observés, en liaison avec la remise en suspension de particules initialement déposées sur les sols des atolls. À la fin des essais atmosphériques, en domaine terrestre, deux zones de l'atoll de Mururoa affichent des activités résiduelles, l'une au nord de l'atoll, par dépôt de ^{239}Pu résultant des essais de sécurité, l'autre à l'ouest de l'atoll, à la suite de l'essai sous ballon Parthénope, de très faible énergie, qui a conduit à des dépôts en $^{239+240}$Pu, sur la zone Faucon, en 1973. Les sols de Fangataufa, quant à eux, gardaient la trace des retombées locales de l'essai sur barge Rigel, dont les produits de fission se sont déposés dans le secteur Nord-Est de l'atoll.

Lorsque cela était nécessaire, des campagnes d'assainissement ont réduit la radioactivité des zones concernées (cf. Chapitre VII). Les activités résiduelles des sols ont été étudiées en fonction de la profondeur des sols, et leur évolution surveillée par l'intermédiaire de mesures sur les végétaux terrestres s'y développant. Plus généralement, ces végétaux, en particulier les espèces *Scaevola sericea*, *Casuarina equisetifolia* et *Cocos nucifera*, ont fait l'objet de mesures régulières des radionucléides les plus représentatifs des groupes de période courte (^{57}Co, ^{58}Co, ^{54}Mn, ^{65}Zn, ^{95}Zr, ^{106}Ru, ^{103}Ru, ^{144}Ce et ^{141}Ce), moyenne (^{60}Co, ^{90}Sr et ^{137}Cs) et longue (^{238}Pu et $^{239+240}$Pu). Les radionucléides à vie courte disparaissaient très rapidement après chaque série d'essais atmosphériques. L'activité massique de la majorité des radionucléides à vie moyenne a suivi une décroissance régulière à partir des valeurs maximales observées en 1966-1967 pour atteindre actuellement des niveaux difficilement quantifiables. Les valeurs des facteurs de transfert racinaire spécifiques des plantes tropicales obtenues à Mururoa à partir d'études réalisées *in situ* sont cohérentes avec celles publiées dans la littérature.

En domaine marin, l'activité volumique des eaux du lagon a évolué suivant trois périodes successives. De 1966 à 1974, les activités volumiques des radionucléides variaient très rapidement au cours du temps, en fonction des essais. De 1975 à 1984, période de transition entre les essais atmosphériques et souterrains, les activités volumiques étaient au niveau de traces pour une majorité de radionucléides. Par conséquent, dès 1974, l'évolution des niveaux moyens des eaux de mer ne pouvait être appréciée qu'à l'aide de celle des indicateurs biologiques : algues, mollusques, crustacés et poissons. De 1985 à 1996, les radionucléides d'origine artificielle décelables dans les eaux de mer se limitaient au tritium sous forme d'eau tritiée (HTO) ainsi qu'aux ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu et $^{239+240}$Pu.

Les sédiments marins ont essentiellement gardé la mémoire des essais sur barge : Aldébaran et Sirius au droit du point Dindon, Arcturus au droit du point Denise, à Mururoa, et Rigel au droit du point Frégate, à Fangataufa. Il en va de même pour l'activité en ^{239}Pu du banc de sable immergé au droit de la zone Colette, conséquence de l'action des tempêtes tropicales de 1981 qui ont entraîné le plutonium initialement fixé sur les *motu* du secteur Nord de l'atoll de Mururoa à la suite des essais de sécurité. L'activité totale en $^{239+240}Pu$ résultant des essais atmosphériques et de sécurité a été estimée à $1,8.10^{13}$ et $7,4.10^{12}$ Bq, à Mururoa et à Fangataufa respectivement, soit des masses résiduelle de ^{239}Pu dans les sédiments de l'ordre de 6,7 kg et 2,8 kg respectivement à Mururoa et Fangataufa.

Comme pour l'eau de mer, durant la période des essais atmosphériques, les radionucléides caractérisés par une période radioactive inférieure à l'année, à savoir ^{57}Co, ^{58}Co, ^{54}Mn, ^{65}Zn, ^{95}Zr, ^{106}Ru, ^{103}Ru, ^{144}Ce et ^{141}Ce, ont été quantifiés dans les différents bioindicateurs aux niveaux les plus élevés. Par la suite, leurs activités massiques ont diminué très rapidement, avec des périodes de décroissance effective du même ordre de grandeur que leur période radioactive, voire même inférieures. Ces radionucléides n'étaient quasiment plus décelés à la fin des essais atmosphériques en 1974. Au cours de la période des essais souterrains de 1975 à 1996, certains radionucléides à vie courte, comme le ^{131}I et le ^{140}Ba pouvaient également être décelés immédiatement à la suite d'opérations de post-forage, en particulier dans le plancton du lagon.

Les activités massiques des radionucléides de période moyenne (^{60}Co, ^{90}Sr et ^{137}Cs) les plus élevées, mesurées sur les bioindicateurs, sont apparues lors des essais atmosphériques sur barge. Cependant, à la fin des années 90, les activités de ces radionucléides avaient rejoint les niveaux du bruit de fond, représentatifs des retombées mondiales. Ainsi, l'activité massique du ^{60}Co de la quasi-totalité des bioindicateurs marins a décru régulièrement, jusqu'à nos jours, pour atteindre aujourd'hui des niveaux très faibles difficilement quantifiables. L'activité massique du ^{137}Cs dans les bioindicateurs a baissé également très rapidement durant la période des essais atmosphériques. Par la suite, elle a diminué plus lentement puisqu'elle intégrait les retombées mondiales issu du réservoir stratosphérique alimenté par les essais réalisés dans l'atmosphère par l'ensemble des puissances nucléaires.

Les radionucléides à vie longue (^{238}Pu et $^{239+240}Pu$), issus des essais sur barge et de sécurité, ont une activité massique peu élevée dans les échantillons biologiques qui a décru lentement au cours du temps.

IV.8 - BIBLIOGRAPHIE

ANONYME (1984). - Report of a New Zealand, Australian, and Papua New Guinea scientific mission to Mururoa Atoll. MoFA Tech. rep., New Zealand Ministry of Foreign Affairs, Wellington.

BABLET J.P., ARNOULD C. & DUCOUSSO R. (1991). - Radioactivité artificielle des parties comestibles d'un mollusque (Bénitier) de l'atoll de Mururoa entre 1967 et 1990, interprétation sanitaire. - Bull. Cancer/Radiother., 78, pp. 197-205.

BOURLAT Y. & MARTIN G. (1992). - Precise determination of the concentration of radiocesium in the water of Mururoa lagoon. - J. Environ. Radioactivity, 17, pp. 13-29.

BOURLAT Y., MILLIES-LACROIX J-C. and DUNOYER B., (1994) - $^{239+240}Pu$ atmospheric radioactivity measurements at Mururoa from 1986 to 1991. Conference on Low-level measurements of actinides and long-lived radionulides in biological and environmental samples, Rio de Janeiro (Brazil), October 15-20, 1992. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 177 n°1 p. 107-120.

BOURLAT Y., MILLES-LACROIX J.C. & NAZARD R. (1995). - Determination of plutonium radioactivity in Mururoa lagoon water. - Conference on Low-level measurements of actinides and long-lived radionulides in biological and environmental samples, Aomori (Japan), July 10-15, 1994. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, articles, Vol. 197 n°2, p. 393-414.

BOURLAT Y., MILLES-LACROIX J.C., Le PETIT G., BOURGUIGNON J. (1996). - 90Sr, 137Cs and 239+240Pu in world ocean water samples collected from 1992 to 1994. - J. Radioanal. Nucl. Chem. 177, 107-120.

BOURLAT Y., MILLES-LACROIX J.C. & MARTIN G. (1996). - Results of measurements made by SMSRB on samples collected in Mururoa by international scientific delegations. - Appl. Radiat. Isot., 47, pp. 951-956.

BOURLAT Y., MILLES-LACROIX J.C., CHIAPPINI R., LE PETIT G. & BABLET J.P. (1997). - Determination of long-lived radionuclides in biological samples collected at Mururoa by a scientific delegation headed by the IAEA. - J. Radioanal. Nucl. Chem., 226 (1-2), pp. 15-22.

CHIAPPINI R., POINTURIER F., MILLIES-LACROIX J.C., LEPETIT G., HEMET P. (1999). - $^{240}Pu/^{239}Pu$ isotopic ratios and $^{239+240}Pu$ total measurements in surface and deep waters around Mururoa and Fangataufa atolls compared with Rangiroa atoll French Polynesia The Science of the Total Environment 269-276.

DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique (1998). - "Lagoon Sediment Radioactivity in Mururoa and Fangataufa," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française.

DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique (1998). - "Soil Radioactivity in Mururoa and Fangataufa," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française.

DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique (1998). - "Current Underground Distribution of Radionuclides at Mururoa and Fangataufa," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française.

Mc EWAN A.C., (1989) - Mururoa revisited. Radiation Protection News and Notes, No. 5, p. 16-20. - National Radiation Laboratory.

MARTIN J.M., THOMAS A.J., CHARRIER B., COUSTEAU J.Y. & SARANO F. (1990). - Assessment of artificial radionucleides issued from french nuclear bomb testing at Mururoa (french Polynesia). - Environmental Technology Letters, 11, n° 3, pp. 197-204.

MASSE L., MUSA C., (1994) - Etude granulométrique des sédiments de surface du lagon de Mururoa. Rapport n°151/SMSR/SESE.

MITCHELL P.I., VINTR L. DAHLGAARD L., H., GASCO C., SANCHEZ-CABEZZA A. (1997). - Perturbation in the $^{240}Pu/^{239}Pu$ global fallout ratio in local sediments following the nuclear accidents at Thule (Greenland) and Palomares (Spain). The Science of the Total Environment 202; 147-153

MITTELSTAEDT E., OSVATH I., POVINEC P., TOGAWAB O., SCOTT E. M. (1999). - Transport of radionuclides from the Mururoa and Fangataufa atolls through the marine environment. The Science of the Total Environment 301-309.

MULSOW S., COQUERY M., DOVLETE C., GASTAUD J., Yoshihiro Ikeuchi, Mai Khanh Pham, PAVEL P., POVINEC P. (1999) Radionuclide concentrations in underground waters of Mururoa and Fangataufa Atolls. The Science of the Total Environment 287-300

OSVATH I., POVINEC P., HUYNH-NGOC L., COMANDUCCI J.-F. (1999). - Underwater gamma surveys of Mururoa and Fangataufa lagoons The Science of the Total Environment 237238 1999 277-286

PARDON D. (1995). - Fangataufa Mururoa, état des lieux des sites d'expérimentations nucléaires français, Editions Glénant, Grenoble.

POVINEC P., WOODHEAD D., BLOWERS P., BONFIELD R., COOPER M., CHEN Q., DAHLGAARD H., DOVLETE C., FOX V., FROEHLICH K., GASTAUD J., GRONING M., HAMILTON T., IKEUCHI H., KANISCH G., KRUGER A., WEE KWONG L.L., MATTHEWS M., MORGENSTERN U., MUSLOW S., PETTERSSON H., SMEDLEY P., TAYLOR B., TAYLOR C., TINKER R. (1999). - Marine radioactivity assessment of Mururoa and Fangataufa atolls. The Science of the Total Environment 249-267

TAZIEFF, H. (1982). - Rapport sur l'ensemble de la mission scientifique en Polynésie Française. Commissariat à l'étude et à la prévention des risques naturels majeurs, Paris 1982.

CHAPITRE V

Évolution de la radioactivité en Polynésie française

Les données présentées dans ce chapitre proviennent de la surveillance radiologique des différents archipels de la Polynésie française mise en place dès la création du CEP. Une grande partie de ces données ont été communiquées au Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (*Unscear*), sous la forme de rapports annuels transmis de 1966 à nos jours. Elles ont été complétées par des données inédites ou extraites de publications disponibles dans des revues scientifiques. Une présentation exhaustive de l'ensemble des milliers de résultats de mesures disponibles étant impossible, une sélection en a été faite, sur la base des résultats des indicateurs les plus représentatifs de l'environnement polynésien, en tenant compte des voies d'exposition potentielles des populations vivant en Polynésie.

L'objectif de ce chapitre est de décrire les situations chroniques les plus caractéristiques de l'évolution, tant spatiale que temporelle, des niveaux d'activité des composantes de l'environnement des îles polynésiennes et de préciser les situations ayant fait l'objet d'une attention particulière en termes d'exposition des populations, pendant la période des essais. Les données environnementales ont été complétées par celles relevant des transferts de radionucléides dans la chaîne alimentaire conduisant à l'Homme. Aussi, un exemple de production agricole sera présenté, celui du lait commercialisé à Tahiti.

L'évolution de l'activité des radionucléides issus des essais atmosphériques est décrite dans les différentes composantes de l'environnement des îles polynésiennes, suivant la même présentation que celle retenue pour les sites d'expérimentations (cf. Chapitre IV). En revanche, les émissions de radionucléides lors des essais souterrains ayant été limitées à l'environnement immédiat des atolls d'expérimentations, elles n'ont donc pas été détectées dans celui des autres atolls.

V.1 - ATMOSPHÈRE

L'indice bêta global a été mesuré sur les aérosols atmosphériques prélevés dans différents atolls polynésiens pendant toute la période des essais, de 1966 à 1996. L'interprétation de ces résultats doit tenir compte des retombées régionales et mondiales des essais réalisés au CEP, ainsi que de la part des retombées mondiales de ceux réalisés à la même époque par la République populaire de Chine. L'intensité de ces retombées était également modulée par les fluctuations saisonnières des retombées mondiales résultant des essais précédemment réalisés

par les autres puissances nucléaires, fluctuations dues à l'accélération des échanges entre la troposphère et la stratosphère durant l'hiver austral.

V.1.1 - INDICE BÊTA GLOBAL

Dès 1962, les atolls polynésiens ont fait l'objet de mesures des radionucléides, tant d'origine naturelle qu'artificielle, permettant d'établir la situation radiologique de référence avant la réalisation du premier essai atmosphérique au CEP. Dans les années 1962-1963, les niveaux de l'activité atmosphérique dans les îles polynésiennes, de l'ordre de 0,01 Bq.m^{-3}, résultaient, comme pour l'ensemble des îles du Pacifique Sud, de la contribution des retombées régionales et mondiales des essais nucléaires réalisés par les pays étrangers, en particulier dans l'hémisphère Sud. Les résultats obtenus dans le cadre de la surveillance continue des aérosols, réalisée à partir de 1962 à Tahiti, permettent aujourd'hui de décrire l'évolution pluriannuelle de la radioactivité de l'atmosphère en Polynésie à partir du suivi de l'indice bêta global (Fig. 154).

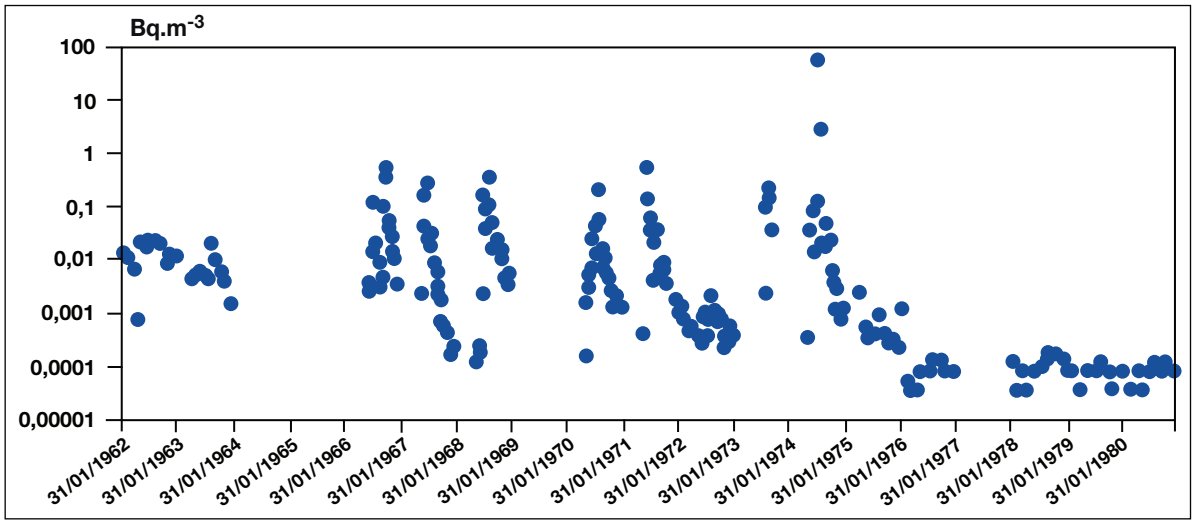


FIG. 154. - Évolution de la moyenne décadaire de l'indice bêta global (Bq.m^{-3}) des aérosols prélevés, entre 1962 et 1980, à Papeete (Tahiti).

De 1966 à 1975, l'évolution de l'indice bêta global montre l'influence des retombées régionales et mondiales des essais atmosphériques réalisés au CEP, avec une fluctuation annuelle très marquée résultant des campagnes d'essais réalisées pendant l'hiver austral et de l'épuration rapide du milieu atmosphérique. Les retombées les plus importantes mesurées à Papeete (Mahina) ont atteint 52 Bq.m^{-3} lors de la décade du 10 au 20 juillet 1974, avec un maximum journalier de 520 Bq.m^{-3}, à la suite de l'essai Centaure du 17 juillet 1974. Comme ce fut alors le cas, la détection de retombées significatives sur un atoll déclenchait des contrôles radiologiques complémentaires des principaux constituants de la chaîne alimentaire de l'atoll affectés par les retombées, avec des fréquences de prélèvement plus importantes (cf. Chapitre VI). Dès la fin de l'année 1975, l'activité volumique associée à l'indice global était revenue aux niveaux représentatifs de cette période dans le Pacifique Sud, soit une activité volumique inférieure à 0,1 mBq.m^{-3}, c'est-à-dire 100 fois plus faible que celle caractérisant l'atmosphère au début des années soixante.

Les résultats de l'évolution temporelle de la radioactivité des aérosols des différents atolls étaient utilisés pour dresser des cartes annuelles de retombées pour l'ensemble du territoire polynésien. Ces informations étaient transmises chaque année à l'*Unscear*. Ainsi, à titre d'exemple, en 1966, l'activité volumique décadaire a fluctué entre la limite de détection et 20 mBq.m^{-3}, atteignant une valeur maximale de 66 Bq.m^{-3} pour la décade du 2 au 12 juillet 1966, à Mangareva (archipel des Gambier), à la suite des retombées de l'essai Aldébaran, réalisé le 2 juillet 1966 à 15h34 TU (Fig. 155).

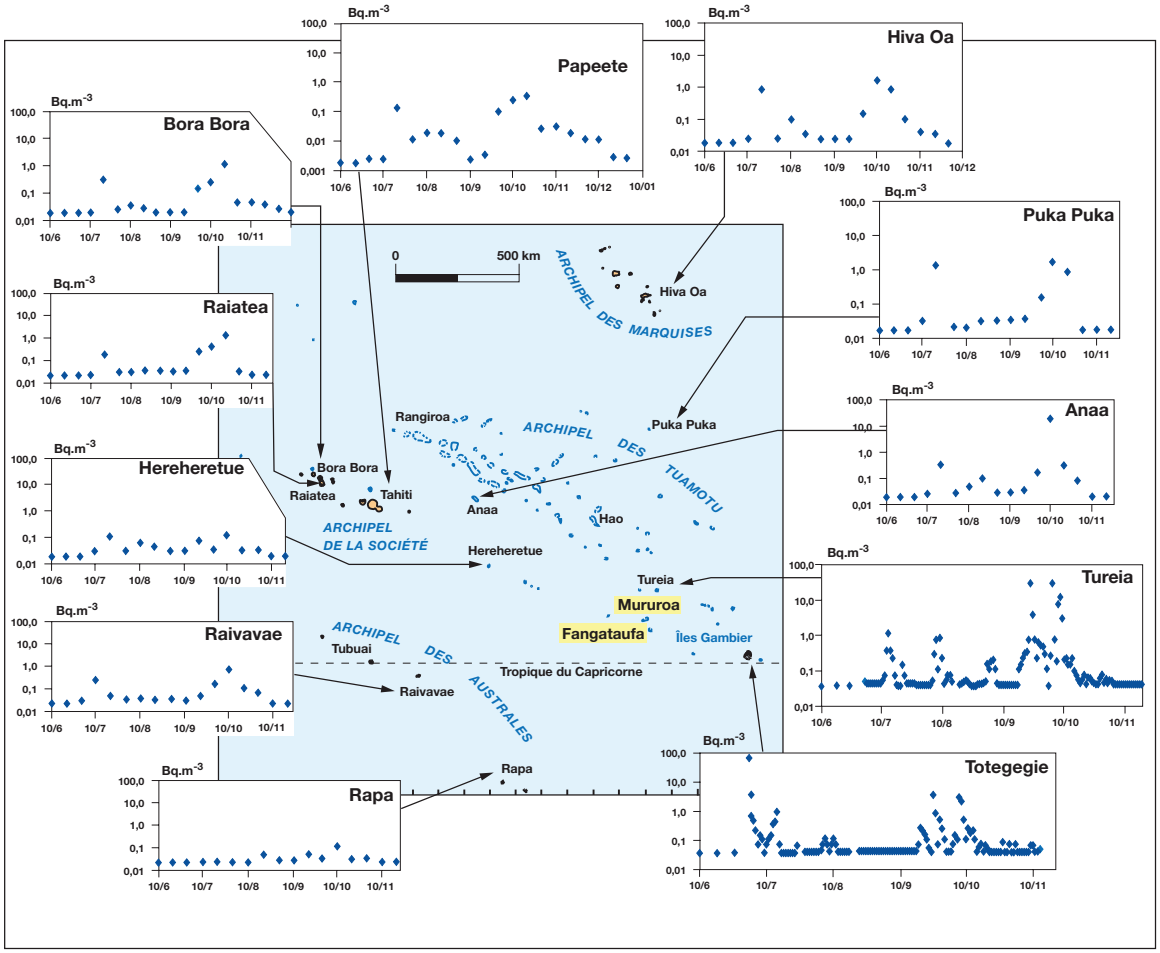


FIG. 155. - Évolution décadaire et journalière (Tureia et Totegegie) de l'indice bêta global (Bq.m^{-3}) dans les aérosols prélevés, de juin à décembre 1966, sur les principaux atolls polynésiens faisant l'objet d'une surveillance radiologique (Rapport RF pour l'*Unscear*).

De 1966 à 1974, cette surveillance atmosphérique a permis de détecter les retombées de l'essai Aldébaran sur Mangareva et celles de l'essai Centaure sur Tahiti ainsi que cinq autres augmentations significatives de l'activité volumique à Tureia et dans l'archipel des Gambier (Tableau 42). Les conséquences radiologiques pour les populations des îles concernées par ces retombées particulières ont alors fait l'objet d'évaluations spécifiques ; leurs résultats sont explicités dans le chapitre consacré aux conséquences radiologiques des essais (cf. Chapitre VI).

TABLEAU 42.
Liste des essais ayant conduit à une augmentation de l'activité volumique de l'atmosphère supérieure aux niveaux caractéristiques des retombées régionales ou mondiales attendues pour les atolls polynésiens.

Essai	Date essai	Iles	Date des retombées	Durée des retombées
Aldébaran	2 juillet 1966	Gambier	2 juillet 1966	1h20
Rigel	24 septembre 1966	Tureia	24 septembre 1966	3h30
Rigel	24 septembre 1966	Gambier	24 septembre 1966	3h00
Arcturus	2 juillet 1967	Tureia	4 juillet 1967	3h00
Encelade	12 juin 1971	Tureia	12 juin 1971	2h30
Phoebé	8 août 1971	Gambier	8 août 1971	0h30
Centaure	17 juillet 1974	Tahiti	17 juillet 1974	12h30

Les niveaux de l'indice bêta global des aérosols prélevés en Polynésie sont actuellement inférieurs à 0,1 mBq.m^{-3}, c'est-à-dire inférieurs d'au moins un ordre de grandeur à ceux mesurés en métropole. Cette différence s'explique par les écarts de l'activité volumique des radionucléides d'origine naturelle, essentiellement les descendants de l'uranium se présentant sous forme particulaire. Ces radionucléides sont émis ou mis en suspension à partir des sols, à des niveaux d'activité volumique plus faibles dans les sols coralliens que dans ceux de la métropole où s'ajoute le ^{137}Cs provenant des retombées des nombreux essais réalisés dans l'hémisphère Nord et de l'accident de Tchernobyl (Fig. 156).

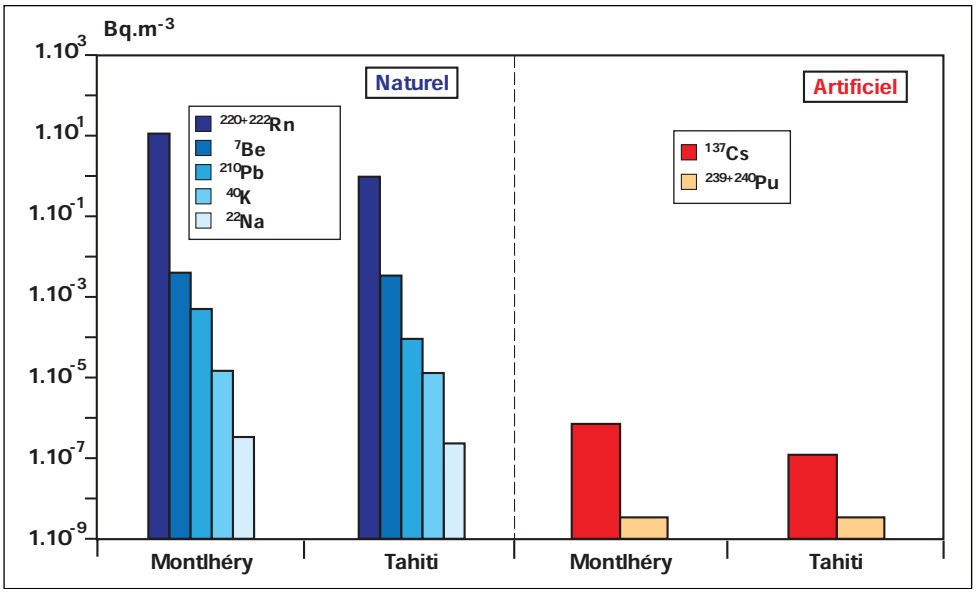


FIG. 156. - Activité volumique (Bq.m^{-3}) des principaux radionucléides d'origine naturelle, $^{220+222}$Rn, ^{7}Be, ^{210}Pb, ^{40}K et ^{22}Na mesurés sur des aérosols prélevés en 1996 à Tahiti et en 1995 à Montlhéry (région parisienne) et des radionucléides d'origine artificielle encore mesurés de nos jours, ^{137}Cs et $^{239+240}$Pu. L'activité volumique du ^{220}Rn et du ^{222}Rn peut varier naturellement d'un ordre de grandeur dans la même journée, en fonction des conditions météorologiques.

V.1.2 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE SUPÉRIEURE À 5 ANS

Parmi les radionucléides émetteurs bêta-gamma, les ^{137}Cs et ^{90}Sr résultant des retombées mondiales et régionales ont été régulièrement recherchés dans les aérosols prélevés en Polynésie. L'évolution décadaire de l'activité volumique en ^{137}Cs à Tahiti est similaire à celle de l'indice bêta global, mais à des niveaux d'activité 100 000 fois plus faibles. De 1970 à 1975, les niveaux étaient stables, entre 20 et 50 $\mu Bq.m^{-3}$, avec des *maxima* pouvant temporairement dépasser 100 $\mu Bq.m^{-3}$ (Fig. 157). Dès 1975, l'évolution de l'activité volumique s'inscrivait dans une tendance à la baisse à laquelle se superposait une composante périodique annuelle traduisant la variation saisonnière de l'intensité des échanges entre la stratosphère et la troposphère.

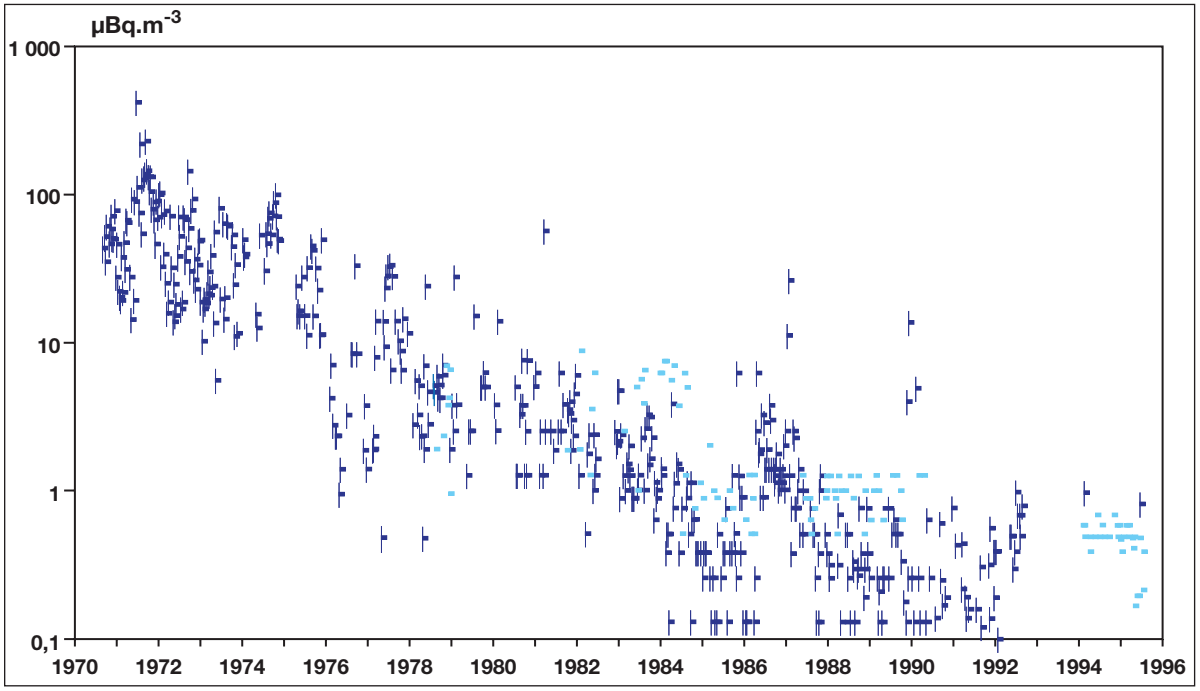


FIG. 157. - Évolution décadaire de l'activité volumique ($\mu Bq.m^{-3}$) en ^{137}Cs des aérosols prélevés, entre 1970 et 1996, à Papeete dans le cadre de la surveillance de la radioactivité de l'atmosphère. Les données sans barre d'erreur sont les valeurs de limite de détection (d'après *IRSN*).

V.1.3 - ISOTOPES DU PLUTONIUM

L'activité volumique atmosphérique en $^{239+\ 240}Pu$ a suivi une baisse régulière de 1960 à nos jours, de sorte que l'activité volumique à Papeete ne pouvait être mesurée qu'en regroupant mensuellement les filtres journaliers. Elle était de l'ordre de 2.10^{-5} $Bq.m^{-3}$ en 1965, de 2.10^{-8} $Bq.m^{-3}$ en 1983, pour atteindre 5.10^{-9} $Bq.m^{-3}$ en 2000.

La comparaison des activités volumiques en $^{239+\ 240}Pu$ observées sur les aérosols collectés en différents points du globe, entre 1960 et 1990, montre que l'ensemble des activités volumiques décroissent au cours du temps suivant des périodes effectives similaires atteignant aujourd'hui des niveaux inférieurs à 10^{-9} $Bq.m^{-3}$ (Fig. 158).

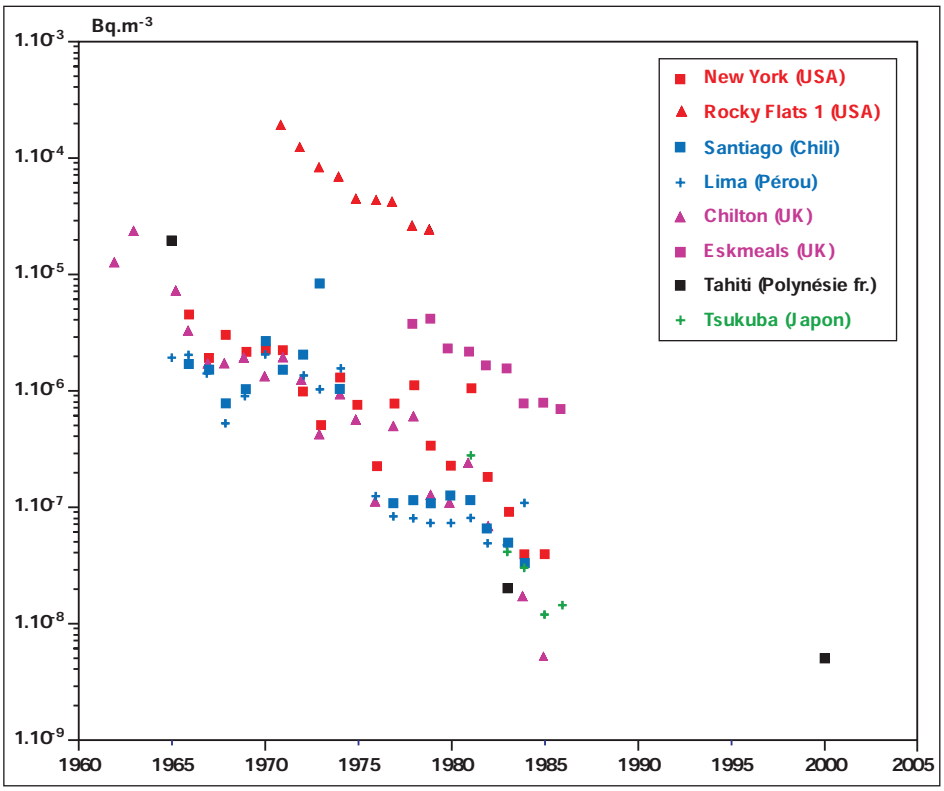


FIG. 158. - Évolution, au cours du temps, de l'activité volumique (Bq.m^{-3}) du $^{239+240}$Pu des aérosols prélevés, de 1960 à 2000, en différentes régions du globe.

V.2 - SOLS

L'indice bêta global a été mesuré sur des échantillons de sols prélevés dans les différents archipels polynésiens durant toute la période des essais nucléaires. Les sols coralliens montrent des valeurs de l'indice bêta global plus faibles que celles des sols caractéristiques des îles hautes, traduisant des compositions différentes en radionucléides d'origine naturelle. Les dépôts surfaciques ont intégré, au cours du temps, les retombées régionales et mondiales des produits de fission générés par les essais atmosphériques américains, britanniques et russes réalisés durant la décennie 1950-1960. Les retombées régionales des essais français, pour la période 1966-1974, et chinoises, jusqu'en 1981, ont également été intégrées à ces dépôts. Néanmoins, par l'action conjointe du lessivage par les eaux de pluie des radionucléides déposés sur les sols et de leur migration vers des horizons plus profonds, l'activité massique des sols a décru plus rapidement au cours du temps que par le simple fait de la décroissance radioactive des radionucléides.

TABLEAU 43.
Niveaux d'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) des principaux radionucléides d'origine naturelle présents dans les sols polynésiens.

Type de sol	^{226}Ra	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Volcanique	48	48	48	814
Corallien	16	15	5	81

Aussi, tenant compte des principales retombées observées à Mangareva, dans l'archipel des Gambier, à la suite des essais Aldébaran, Rigel et Phoebé et, à Tahiti, après l'essai Centaure, la distribution des radionucléides dans les différents types de sols de ces deux îles est décrite précisément ci-après (cf. Chapitre III). Ces deux îles hautes sont à des stades comparables de leur évolution. Elles sont caractérisées par des récifs-barrières discontinus répartis autour de reliefs volcaniques érodés offrant des sols similaires. De plus, elles sont représentatives des îles ayant une vocation agricole, Tahiti avec une production toujours significative et Mangareva pour ses productions qui alimentaient le CEP.

V.2.1 - RADIOACTIVITÉ DES SOLS DE TAHITI

Outre la surveillance régulière de points représentatifs, des cartographies complètes des sols de l'île de Tahiti ont été réalisées au cours de campagnes en 1974, 1987 et 1989 le long de la route littorale et suivant des radiales allant de la côte jusqu'au plateau. Sur chaque radiale, des échantillons étaient systématiquement prélevés sur le plateau, à mi-pente, dans la vallée et à proximité de la route longeant le littoral. Ces sols avaient des caractéristiques différentes pouvant influencer l'évolution des dépôts initiaux (cf. Chapitre III).

V.2.1.1 - INDICE BÊTA GLOBAL

Les dépôts les plus élevés le long du littoral à proximité de Teahupoo au sud de l'isthme de Taravao, et à Hitiaa sur la côte Est de l'île (Fig. 159). Ils résultaient des retombées de l'essai Centaure du 17 juillet 1974 et les valeurs maximales de l'activité surfacique de ces dépôts, de l'ordre de 2.10^7 Bq.m^{-2}, traduisent l'arrivée du nuage par la côte Sud-Est et son lessivage par des pluies localisées. Les niveaux étaient 10 fois plus faibles dans le secteur Ouest, d'Arue à Papara. Ces retombées se sont additionnées aux résidus des dépôts antérieurs dus aux retombées mondiales, les augmentant d'un ordre de grandeur dans la partie Est de l'île.

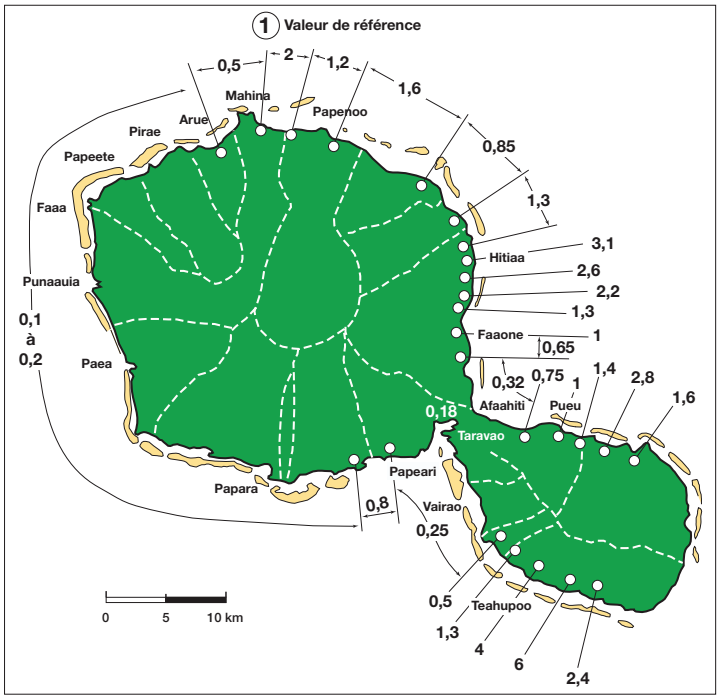


FIG. 159. - Valeurs relatives des dépôts dus aux retombées de l'essai Centaure, par rapport à la valeur de référence de $2,5.10^6$ Bq.m^{-2} mesurée à la station de Mahina, sur les sols de bord de route, le 19 juillet 1974.

V.2.1.2 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE SUPÉRIEURE À 5 ANS

Parmi les radionucléides émetteurs bêta-gamma contribuant à l'indice bêta global, le ^{137}Cs a été détecté dans les sols de Tahiti (Fig. 160). Ainsi en 1987-1989, l'amplitude des activités surfaciques mesurées couvrait deux ordres de grandeur, fluctuant de 0,1 à 7,2 kBq.m^{-2}, respectivement entre les activités surfaciques minimales, à l'ouest de l'île, et celles maximales sur les radiales de Mahaena et Hitiaa, sur la côte Est.

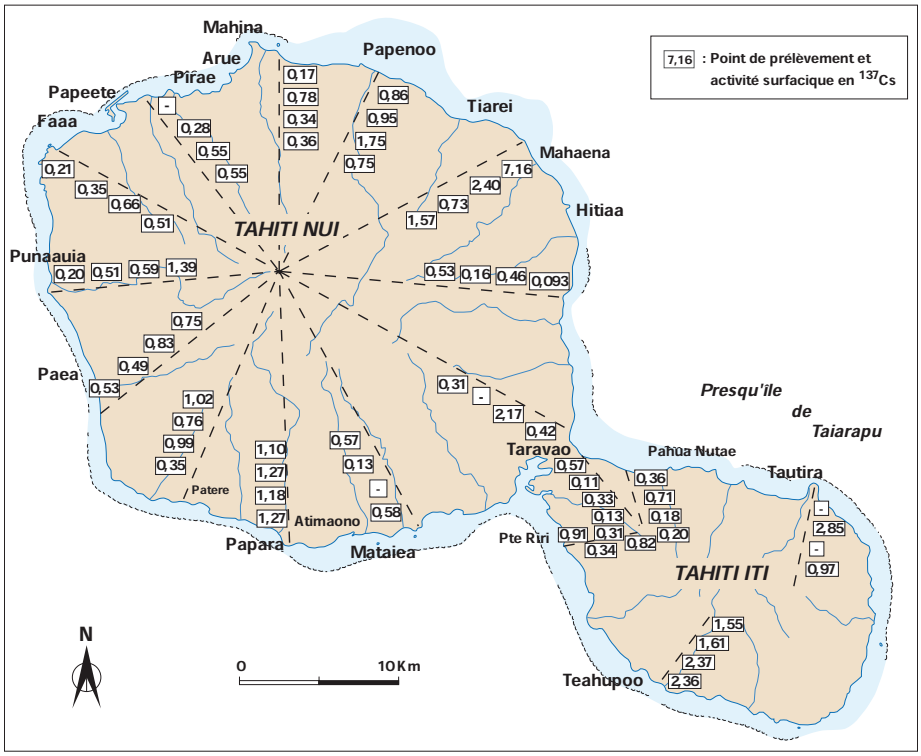


FIG. 160. - Activité surfacique (kBq.m^{-2}) des dépôts de ^{137}Cs mesurés en 1987-1989 dans les sols de l'île de Tahiti.

Les activités surfaciques de dépôts en ^{137}Cs dues aux retombées mondiales cumulées jusqu'à la date des prélèvements ont été évaluées en considérant les niveaux d'activité des sols de la côte Ouest où la contribution des retombées de l'essai Centaure était la plus faible, de l'ordre de 0,2 à 1,3 kBq.m^{-2}. À la même époque, les dépôts de ^{137}Cs en métropole se situaient en moyenne entre 1 et 10 kBq.m^{-2} et pouvaient atteindre ponctuellement quelques dizaines de kBq.m^{-2}.

L'évolution de l'activité massique des sols entre 1974 et 1989, a été influencée par leur teneur en matière organique et surtout par l'importance du lessivage, du ruissellement ainsi que de l'érosion des flancs de montagne et des plaines côtières par les eaux de pluie. Quelle que soit la nature des sols, l'activité en ^{137}Cs diminuait avec la profondeur (Fig. 161). Ainsi, l'activité massique moyenne du ^{137}Cs, tous prélèvements confondus, décroissait d'un facteur 5 entre la surface et 42 cm de profondeur. En revanche, les radionucléides des chaînes naturelles, ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th et ^{40}K, présentaient des activités massiques homogènes sur toute la profondeur des sols échantillonnés.

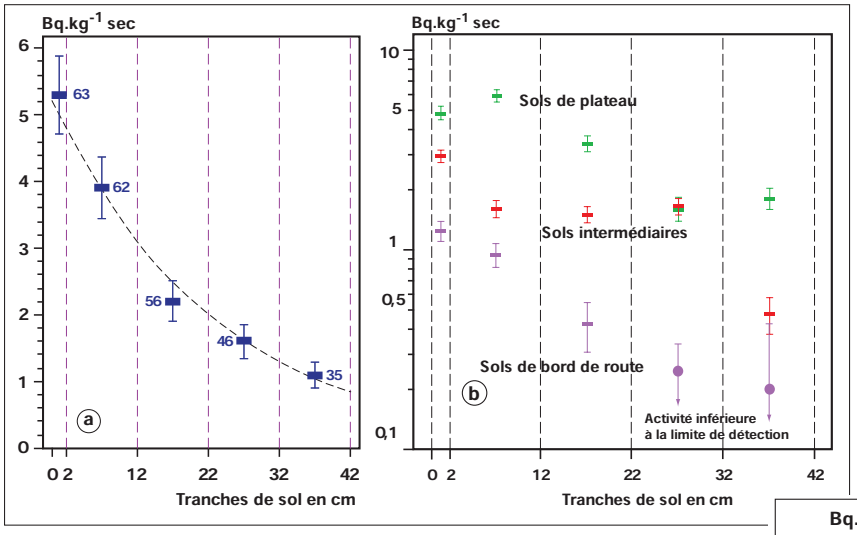


FIG. 161. - Profils de l'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) moyenne du ^{137}Cs des sols de Tahiti (a) et des différents sols prélevés, suivant la radiale de Punaauia, sur la côte Ouest de l'île (b) précisée sur la figure 160.
Les incertitudes de mesures sont données à 1 σ et les chiffres associés à la courbe (a) représente le nombre de prélèvements mesurés.

Dans les sols ferralitiques, l'activité massique en ^{137}Cs augmentait linéairement avec la quantité de matière organique présente dans les différents échantillons prélevés à Tahiti (Fig. 162). Néanmoins, les valeurs maximales d'activité observées étant à 10 Bq.kg^{-1}, cette relation ne pouvait pas être vérifiée pour des teneurs en matières organiques supérieures à 10%.

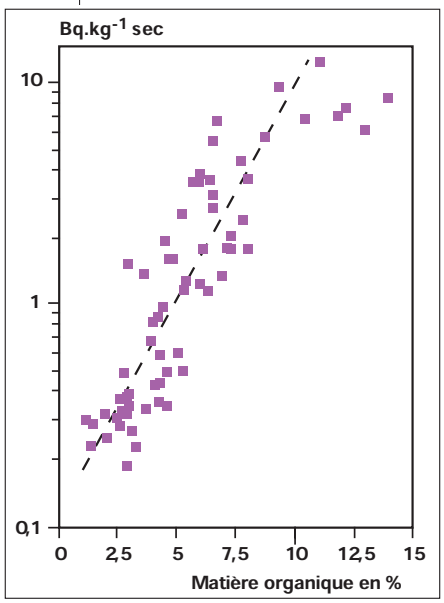


FIG. 162. - Relation entre l'activité massique (Bq.kg^{-1}sec) en ^{137}Cs et la teneur en matière organique des sols ferralitiques.

V.2.2 - RADIOACTIVITÉ DES SOLS DE MANGAREVA

Un bilan de la radioactivité des sols de l'île de Mangareva a été réalisé, en 1993, à partir d'échantillons prélevés en vingt emplacements représentatifs des différents types de sol de l'île.

En 1993, l'activité surfacique en ^{137}Cs, en fonction des types de sol, variait entre la limite de détection de 0,06 kBq.m^{-2} et une valeur maximale de 1,67 kBq.m^{-2} (Fig. 163). La moyenne était de 0,80 kBq.m^{-2}, du même ordre de grandeur que celle observée sur Tahiti.

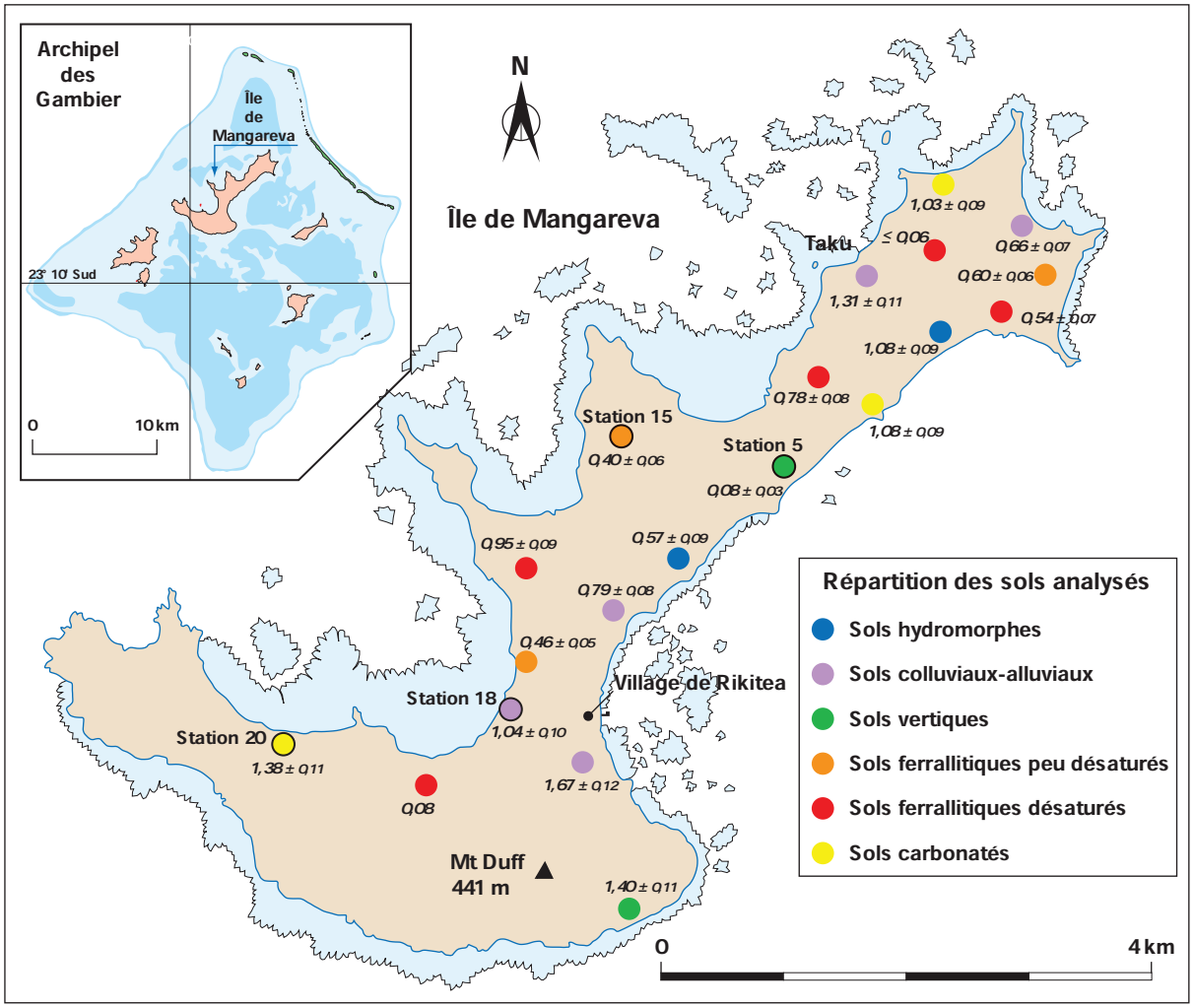


FIG. 163. - Activité surfacique (kBq.m^{-2}) en ^{137}Cs des sols prélevés en 1993 dans l'île de Mangareva de l'archipel des Gambier.

Les activités massiques moyennes en ^{137}Cs décroissaient avec la profondeur pour tous les types de sol échantillonnés (Fig. 164). Ainsi, l'activité massique moyenne de l'horizon 0-2 cm était de 5,74 ± 0,84 Bq.kg^{-1} sec, pour une amplitude comprise entre 0,68 et 12,9 Bq.kg^{-1} sec, et variait entre 1,86 et 4,5 Bq.kg^{-1} sec dans l'horizon 32-42 cm. Comme pour Tahiti, les retombées régionales qui ont parfois affecté les îles de cet archipel se sont additionnées aux dépôts des retombées mondiales, homogènes à l'échelle de la Polynésie. Les dépôts de ces dernières ont été estimés à partir des résultats de mesures réalisées sur les sols prélevés dans l'archipel le plus éloigné du CEP, celui des Marquises, sur l'île de Nuku Hiva où à la même époque, les activités massiques étaient comprises entre 0,32 ± 0,14 et 2,12 ± 0,84 Bq.kg^{-1} sec.

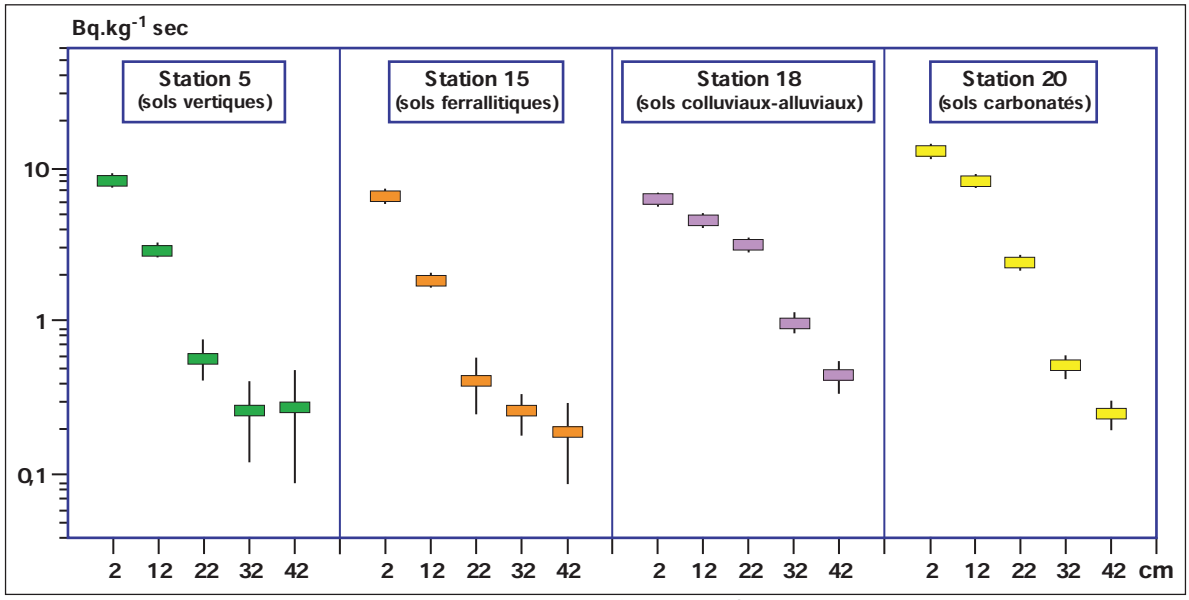


FIG. 164. - Exemple de profils d'activité massique (Bq.kg^{-1} sec) en ^{137}Cs des différents types de sol de l'île de Mangareva prélevés en 1963. La position géographique des stations de prélèvement est indiquée sur la figure 163.

V.2.3 - DÉBIT DE DOSE ENVIRONNEMENTAL

Différentes mesures du débit de dose environnemental représentatif de l'irradiation ambiante ont été réalisées, entre 1985 et 1996, au moyen des dosimètres thermoluminescents au $CaSO_4$ positionnés en plusieurs sites de mesure de différentes îles polynésiennes. La valeur moyenne annuelle pour chaque archipel a été calculée à partir des résultats obtenus sur ces sites de mesure (Tableau 44). Ainsi, pour Tahiti, la valeur moyenne annuelle a été établie à partir des résultats obtenus sur 21 sites de mesure.

TABLEAU 44.
Évaluation de la dose externe annuelle (µGy.an^{-1}) des îles des différents archipels polynésiens.

Île ou archipel	Dose annuelle moyenne	Dose annuelle par île surveillée	
Tuamotu-Gambier (atolls coralliens sauf les îles Gambier)	280	Tematangi	280
		Tureia	290
		Marutea Sud	250
		Hao	280
		Reao	260
		Gambier (Mangareva)	300
Tahiti (île haute entourée d'un récif corallien)	480	Minimum (en bordure littorale)	390
		Maximum (à l'intérieur de l'île)	570
Îles Marquises (îles hautes sans récif corallien)	700	Nuku Hiva	730
		Hiva Oa	660
Îles Australes (îles hautes entourées d'un récif corallien)	380	Rapa	420
		Rurutu	340

L'irradiation ambiante annuelle des archipels des Tuamotu et des Gambier est faible, de l'ordre de 300 µGy.an^{-1}, la contribution du rayonnement d'origine tellurique étant peu élevée pour des sols coralliens. En effet, l'activité massique en ^{40}K de ces sols est inférieure à 5 Bq.kg^{-1} sec, celle des éléments des séries radioactives naturelles du ^{232}Th inférieure à 3 Bq.kg^{-1} sec et celle de ^{238}U de l'ordre de 20 Bq.kg^{-1} sec. La rupture de l'équilibre radioactif constatée sur la série de ^{238}U à partir du ^{226}Ra (inférieur à 1 Bq.kg^{-1} sec) conduit donc à réduire la contribution relative des émissions de ces radionucléides à l'irradiation tellurique des sols coralliens.

Les îles hautes des autres archipels présentent des niveaux d'exposition annuels pouvant atteindre 700 µGy.an^{-1}. Ces niveaux s'expliquent par la contribution importante du rayonnement tellurique en raison de la présence dans les sols d'éléments d'origine volcanique, en particulier des radionucléides des séries naturelles de l'uranium et du thorium.

En France métropolitaine, les débits de dose, en général plus élevés, proviennent précisément d'une contribution plus importante du rayonnement d'origine tellurique (Fig. 165). Cette contribution est plus forte dans les massifs montagneux anciens, comme le Massif armoricain et le Massif central, que dans les bassins sédimentaires, comme la région parisienne, en raison des activités plus élevées des radionucléides d'origine naturelle. Les activités massiques des radionucléides de la série de l'uranium des granites des régions métropolitaines sont plus élevées que celles des basaltes polynésiens.

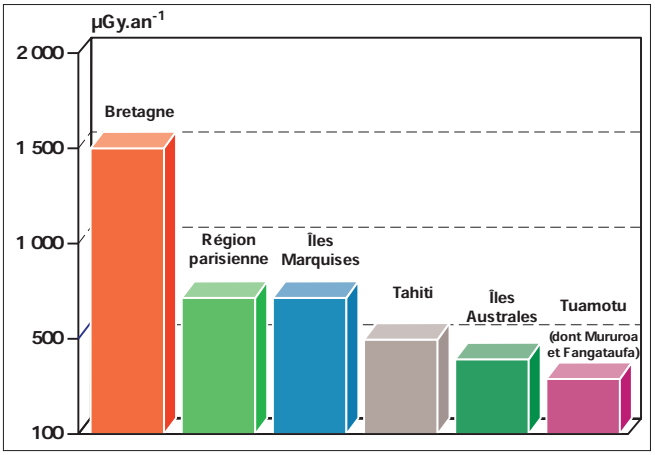


FIG. 165. - Evaluation des doses externes annuelles (µGy.an^{-1}) des différents archipels polynésiens, de la région parisienne et de la Bretagne.

V.3 - PLANTES TERRESTRES

La surveillance radiologique des plantes terrestres polynésiennes concernait principalement les productions agricoles végétales entrant dans les chaînes alimentaires des populations vivant en Polynésie.

V.3.1 - INDICE BÊTA GLOBAL

Le ^{40}K est parmi les radionucléides émetteur bêta-gamma présent naturellement dans les organismes vivants celui dont l'activité massique est la plus élevée. La prépondérance de cet élément dans les échantillons biologiques fait que les résultats de l'indice bêta global doivent être interprétés avec précaution. Lors de la période des retombées mondiales les plus importantes, de la fin des années 50 au début des années 60, le pourcentage de la contribution du ^{40}K à l'indice bêta global était systématiquement estimé afin de déduire par différence celui des radionucléides d'origine artificielle. En 1962, le pourcentage moyen de ^{40}K des végétaux-feuilles, comme les salades et les choux, et celui des fruits étaient respectivement de 64 % et 79 % ; des valeurs à comparer aux 41 % mesurés sur les végétaux prélevés en métropole la même année.

En 1962, les radionucléides d'origine artificielle contribuant le plus fortement à l'indice bêta global étaient principalement les ^{95}Zr, ^{103}Ru, ^{106}Ru, ^{141}Ce, ^{144}Ce et ^{137}Cs. Ils étaient mesurés dans les échantillons d'herbe et dans les végétaux-feuilles prélevés dans les différents archipels polynésiens à des niveaux d'activité massique proches de ceux des mêmes types d'échantillons prélevés en métropole.

V.3.2 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE SUPÉRIEURE À 5 ANS

La distribution géographique et l'évolution, au cours du temps, de l'activité du ^{137}Cs dans les végétaux peuvent être considérées comme représentatives de l'influence des retombées en Polynésie. Depuis 1966, dans le cadre de la surveillance radiologique des essais nucléaires, des mesures de la radioactivité des noix de coco sont réalisées sur l'ensemble du territoire de la Polynésie française. Entre 1966 et 1996, 1 250 échantillons de coprah et d'eau de coco ont été prélevés sur les 44 îles hautes ou atolls faisant l'objet de la surveillance radiologique.

Le ^{137}Cs est le principal radionucléide détecté dans les végétaux, en particulier dans le coprah des noix de coco où il s'accumule à des niveaux plus élevés que dans l'eau de coco. Les activités massiques du ^{137}Cs dans le coprah des noix de coco des différents atolls sont représentatives et proportionnelles à la répartition spatiale des retombées régionales et mondiales sur l'ensemble du territoire polynésien. Les variations géographiques de l'activité moyenne en ^{137}Cs du coprah, durant cette période, montrent que les îles caractérisées par les valeurs les plus élevées se situaient à l'est et au nord-est des atolls de Mururoa et de Fangataufa (Tableau 45).

L'activité massique moyenne la plus élevée, 130 $Bq.kg^{-1}$ exprimée en poids frais, et l'activité massique maximale, 280 $Bq.kg^{-1}$ frais, mesurée en 1971, ont été observées sur l'atoll inhabité de Maria. Cette île est située sur l'axe principal, orienté vers l'Est, de la dispersion des nuages générés par les essais nucléaires atmosphériques réalisés à Mururoa et Fangataufa.

Les îles des Tuamotu Sud-Est, de Tureia à Reao et les atolls inhabités du groupe Actéon, situés au sud et au nord de l'axe de dispersion recherché, ont également été occasionnellement soumis à des retombées atmosphériques régionales. Néanmoins, l'activité massique du coprah des noix de coco collectées sur ces îles était faible, comprise entre 15 et 25 $Bq.kg^{-1}$ frais, reflétant l'amplitude limitée des retombées durant cette période. Le coprah issu des noix de coco collectées sur la majorité des îles de l'archipel des Tuamotu et de Tubuai, des îles Australes, avait des activités moyennes d'environ 10 $Bq.kg^{-1}$ frais.

TABLEAU 45.
Activité massique ($Bq.kg^{-1}$ frais) moyenne, minimale et maximale du ^{137}Cs mesurée sur des échantillons de coprah issus de noix de coco prélevées entre 1966 et 1974 dans les différents archipels de Polynésie.
Le nombre d'échantillons est donné entre parenthèses.

Secteur géographique	^{137}Cs ($Bq.kg^{-1}$ frais)		
	Moyenne	Minimum	Maximum
Atoll de Maria - Actéon	**130 (*9*)**	**51**	**280**
Tuamotu du Sud-Est - Actéon	**18 (*176*)**	**1,9**	**59**
Îles Australes - Tubuai	**14 (*24*)**	**1,4**	**40**
Tuamotu Nord et centre et Mururoa	**10 (*166*)**	**1,1**	**51**
Îles Australes - autres que Tubuai	**2,7 (*8*)**	**0,41**	**8,1**
Îles Gambier - Mangareva	**2,7 (*65*)**	**0,11**	**10**
Tahiti et îles-Sous-le-Vent	**2,4 (*132*)**	**0,07**	**20**
Îles Marquises	**0,63 (*21*)**	**0,04**	**4,8**

Dans tous les autres archipels, les activités massiques moyennes étaient inférieures à 10 $Bq.kg^{-1}$ frais. Le coprah provenant des îles Marquises avait les niveaux d'activité massique les plus faibles avec une moyenne de 0,6 $Bq.kg^{-1}$ frais et de 4,8 $Bq.kg^{-1}$ frais en valeur maximale.

Bien que l'île haute de Mangareva de l'archipel des Gambier, située au sud de l'axe des retombées, ait été affectée par des retombées régionales en 1966 et 1971 (Tableau 42), les activités massiques du coprah en ^{137}Cs y étaient faibles, de l'ordre de 3 $Bq.kg^{-1}$ frais. L'explication la plus probable est à rechercher, dans la lixiviation par les pluies du césium présent dans les sols, mais aussi dans les processus de compétition entre le potassium et le césium au niveau des transferts sol-plante. Les sols de Mangareva ont des teneurs en potassium supérieures à celles des sols coralliens. Le potassium, analogue chimique naturel du césium, est donc absorbé préférentiellement par voie racinaire par la plante, puis s'accumule par translocation dans le coprah. Il en résulterait un transfert de ^{137}Cs dans la noix de coco plus faible que celui observé sur les atolls voisins ayant des sols moins riches en potassium.

L'île de Tureia, dans l'archipel des Tuamotu, peut être considérée comme représentative des îles se trouvant au nord de la zone des retombées atmosphériques centrée sur l'axe principal attendu de la dispersion du nuage produit par les essais. L'évolution au cours du temps des activités massiques en ^{137}Cs du coprah des noix de coco prélevées dans cette île montre des fluctuations importantes autour d'une valeur moyenne annuelle de 20 $Bq.Kg^{-1}$ pendant la période des essais atmosphériques (Fig. 166). À partir de 1975, l'activité massique décroît progressivement avec le temps suivant une période de décroissance effective de l'ordre de 10 ans et atteint une activité de l'ordre de 4 à 5 $Bq.kg^{-1}$ frais en 1996.

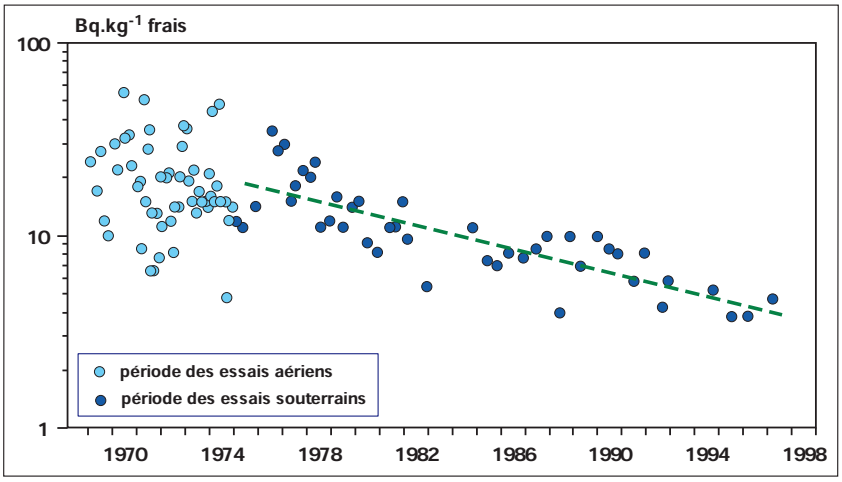


FIG. 166. - Évolution de l'activité massique ($Bq.kg^{-1}$ frais) en ^{137}Cs des échantillons de coprah prélevés, de 1969 à 1997, sur l'atoll de Tureia.

V.4 - PRODUCTION AGRICOLE : LE LAIT

Dès 1966, les productions laitières ont fait l'objet d'une surveillance radiologique particulière, avec la quantification entre autres, des radionucléides à vie courte comme l'^{131}I et à vie moyenne, comme le ^{137}Cs, de période respective de 8 jours et 30,1 ans.

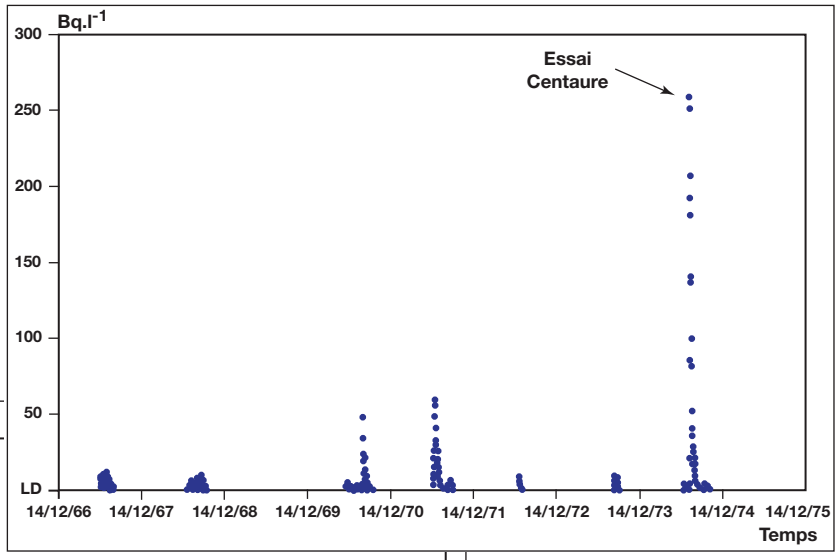
V.4.1 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE INFÉRIEURE À 1 AN

L'évolution générale des radionucléides à vie courte montre des augmentations ponctuelles de l'activité limitées à la période des campagnes d'essais atmosphériques. Ainsi, l'apparition du ^{131}I dans les laits produits à Tahiti et commercialisés à Papeete a été observée temporairement pendant chaque campagne d'essais, de 1966 à 1974, mais à des niveaux variables (Fig. 167).

La valeur maximale de 255 $Bq.l^{-1}$ de l'activité volumique en ^{131}I de ces laits a été atteinte le 27 juillet 1974, soit 8 jours après le dépôt des radionucléides associés aux retombées atmosphériques de l'essai Centaure, réalisé le 17 juillet (Fig. 168). Les productions issues de la partie Est de l'île où les dépôts ont été les plus importants (cf. paragraphe sur la radioactivité des sols de Tahiti) et où pâturait une partie des vaches laitières ont montré une évolution similaire au cours du temps mais avec des niveaux plus élevés (Fig. 187).

À la suite de ces retombées, une estimation des doses à la population a été réalisée afin de vérifier le respect de la limite d'exposition annuelle. Les calculs ont été actualisés en 2006 en utilisant les données de surveillance de 1974 et les facteurs de dose en vigueur (cf. Chapitre VI).

FIG. 167. - Évolution journalière de l'activité volumique ($Bq.l^{-1}$) en ^{131}I du lait de vache collecté de 1966 à 1975 sur le marché de Papeete, à Tahiti, dans le cadre de la surveillance radiologique des aliments. ^{131}I n'a plus jamais été détecté dans les laits à partir de 1975.



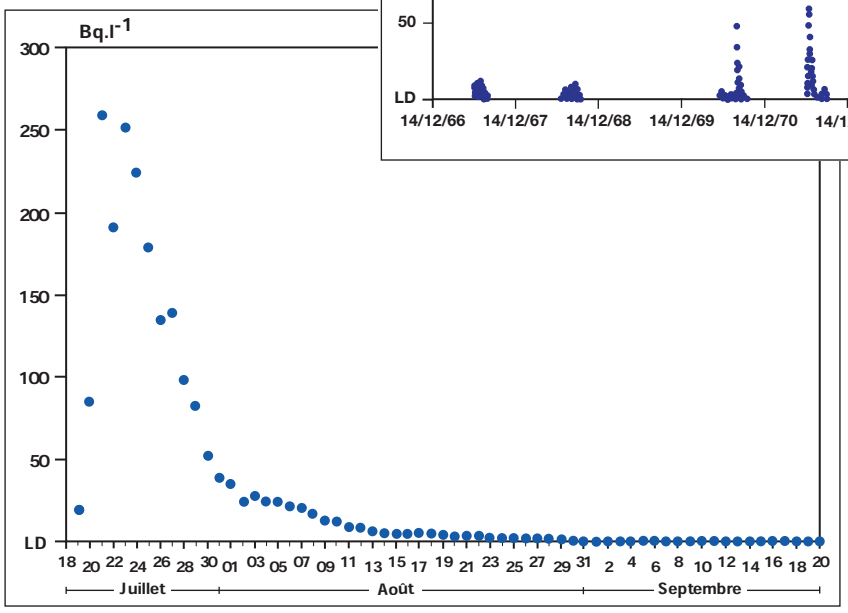


FIG. 168. - Activité volumique ($Bq.l^{-1}$) journalière de ^{131}I mesurée dans le lait collecté sur le marché de Papeete à Tahiti, de juillet à septembre 1974 dans le cadre de la surveillance radiologique des aliments.

V.4.2 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE SUPÉRIEURE À 5 ANS

En 1969, l'activité volumique moyenne du ^{137}Cs dans le lait collecté à Tahiti était de 3,5 $Bq.l^{-1}$. L'évolution pluriannuelle de l'activité volumique de ce radionucléide a ensuite suivi une décroissance rapide, entre 1969 et 1978, puis une décroissance plus lente, jusqu'en 1992 (Fig. 169). De 1993 à nos jours, l'activité volumique est restée constante, à un niveau très faible, proche de 1 $Bq.l^{-1}$ et du même ordre de grandeur que les incertitudes associées à ces mesures et de la limite de détection. Cette stabilité des activités du lait reflète celle de l'activité massique en ^{137}Cs de l'horizon superficiel des sols tahitiens où paissent les vaches. En effet, les sols de prairies sur lesquelles pâturent les animaux ou servant à la production de fourrage sont pauvres en potassium, donc, comme cela a été expliqué précédemment, favorables aux transferts racinaires sol-plante du césium. De plus, ces prairies sont constituées de deux graminées fourragères, *Serratia sp.* et *Batiki sp.*, caractérisées par des facteurs de transfert du césium plus élevés que ceux des autres espèces de végétaux.

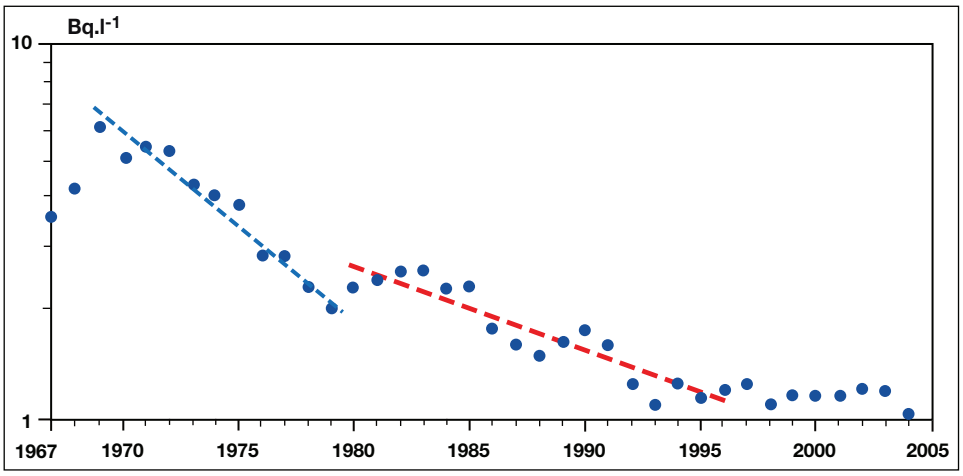


FIG. 169. - Évolution annuelle de l'activité volumique ($Bq.l^{-1}$) en ^{137}Cs du lait de vache collecté, de 1967 à 2004, à Tahiti (D'après rapport IRSN, 2005).

De 1967 à 1980, la période effective de décroissance du ^{137}Cs dans le lait était inférieure à 5 ans. Calculée sur la période 1967-1995, elle est proche de 15 ans, c'est-à-dire inférieure de moitié à sa période radioactive. Ces deux phases traduisent un appauvrissement initial rapide de la fraction la plus labile du césium déposé sur les sols puis le lent appauvrissement dû au fait qu'une partie des pertes en ^{137}Cs par le lessivage des sols a été compensée par l'apport des retombées mondiales. Autour de cette tendance pluriannuelle, des fluctuations de faible ampleur de l'activité volumique du ^{137}Cs étaient observées. Ainsi, en 1974, année des retombées les plus importantes observées sur Tahiti à la suite de l'essai Centaure, les activités volumiques d'échantillons de lait collectés à Tahiti ont fluctué entre la limite de détection de 1 $Bq.l^{-1}$ et près de 6 $Bq.l^{-1}$ le 12 août (Fig. 170). Compte tenu des niveaux résiduels en ^{137}Cs dans les dépôts au sol résultant de sa période radioactive et de sa persistance dans les retombées mondiales, l'influence des retombées immédiates n'était pas aussi marquée que pour les radionucléides à vie courte. En revanche, les fluctuations locales en ^{137}Cs pendant la période des essais atmosphériques pouvaient être plus importantes entre les zones de production de lait. Ainsi, le lait collecté à Hitiaa a atteint

une activité volumique maximale de 14,4 Bq.l^{-1}, en août 1974, reflet de l'activité des sols et des herbes de la zone paturée à Taravao où les dépôts, dus aux retombées de l'essai Centaure, ont été les plus élevés.

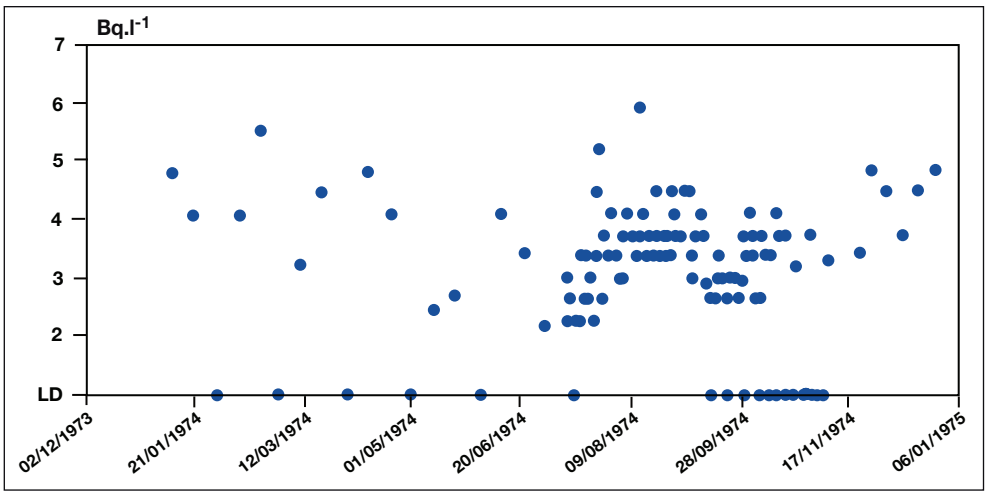


FIG. 170. - Activité volumique (Bq.l^{-1}) du ^{137}Cs mesuré dans le lait collecté au marché de Papeete à Tahiti de décembre 1973 à janvier 1975 dans le cadre de la surveillance radiologique des aliments. (LD = Limite de détection).

V.5 - EAUX OCÉANIQUES

Le tritium est un radionucléide considéré comme un traceur conservatif des masses d'eau marines. À ce titre, les retombées mondiales de tritium, à la surface des océans, ont été mesurées pour être utilisées par les océanographes afin de quantifier la vitesse de mélange des masses d'eau de surface avec celles plus profondes. Ces études permettent de disposer de nombreuses références scientifiques sur les activités volumiques du tritium au sein des eaux des différents océans et de pouvoir les comparer avec celles obtenues en Polynésie. Le ^{90}Sr, le ^{137}Cs et le $^{239+240}$Pu ont également fait l'objet de nombreuses études qui ont permis de comparer les niveaux d'activité volumique mesurés au sein des eaux polynésiennes, à ceux des autres mers et océans.

Les données présentées dans ce paragraphe viennent compléter celles concernant les eaux océaniques aux abords des sites d'expérimentations exposées dans le chapitre IV.

V.5.1 - TRITIUM

L'activité volumique du tritium dans les eaux océaniques, n'a été quantifiée qu'à partir de 1993 car les méthodes d'analyse utilisées en routine, avant cette date, à savoir l'enrichissement électrolytique suivi d'une mesure par scintillation liquide, bien que très performantes, ne permettaient pas de quantifier les activités volumiques inférieures à 200, voire 300 Bq.m^{-3}. Cette limite de détection était insuffisante pour atteindre les niveaux d'activité volumique caractéristiques du bruit de fond des océans, et en particulier de celui de l'océan Pacifique, d'environ 150 Bq.m^{-3}. En revanche, les niveaux d'activité de l'ordre d'une dizaine de Bq.m^{-3} peuvent être quantifiés par spectrométrie de masse, par double mesure de l'hélium-3 qui se forme par désintégration du tritium.

Cette technique de mesure n'est pas employée en routine car le délai d'attente entre les deux mesures dépasse un an. Néanmoins, en 1988, des mesures de tritium ont été réalisées par cette technique sur trois profils verticaux, l'un au large de Tahiti, les deux autres aux limites Est et Ouest des eaux territoriales de l'atoll de Mururoa, dans le sens de la circulation des masses d'eaux océaniques orientée d'est en ouest (Fig. 171).

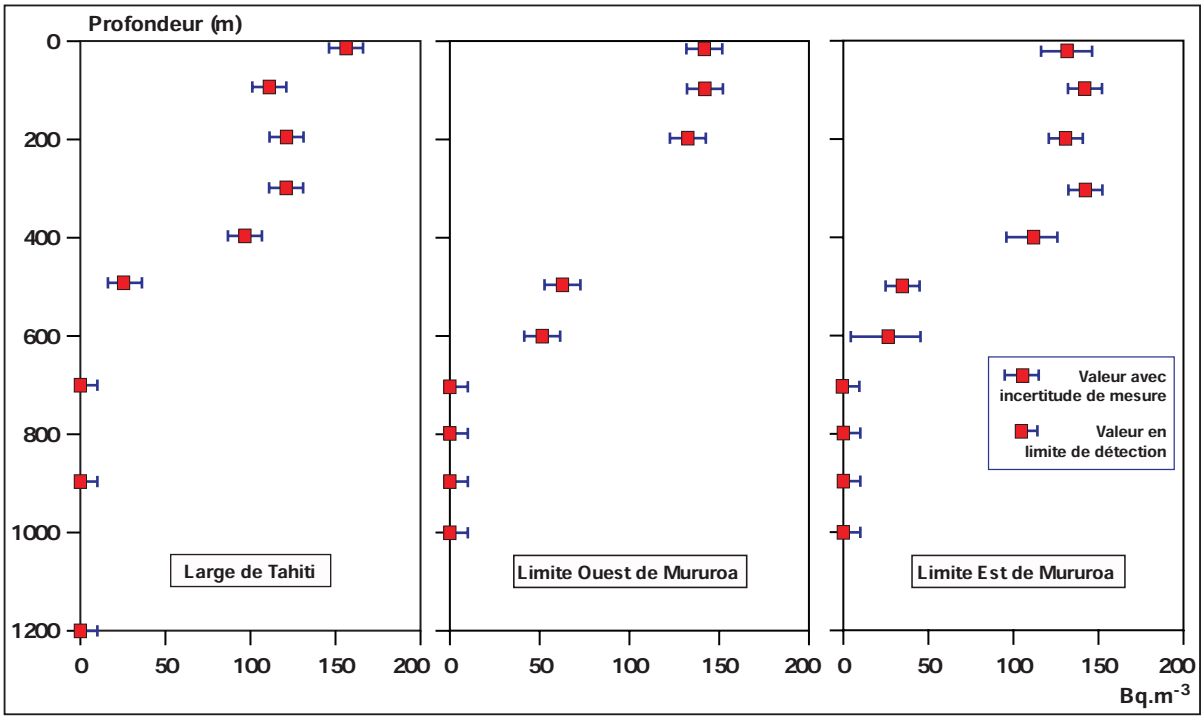


FIG. 171. - Profils verticaux de l'activité volumique (Bq.m^{-3}) en tritium (forme HTO) des eaux océaniques prélevées en 1988 à différentes profondeurs, au large de Tahiti et aux limites Ouest et Est des eaux territoriales de l'atoll de Mururoa. Les incertitudes de mesure sont données à ± 2 σ.

Les profils des trois stations de prélèvement étaient similaires. Les activités volumiques maximales, de l'ordre de 150 Bq.m^{-3}, ont été mesurées dans les masses d'eau superficielles, de 0 à 300 mètres de profondeur. Elles décroissaient ensuite rapidement avec la profondeur au niveau de la thermocline pour atteindre 50 Bq.m^{-3}, et être inférieures à la limite de détection au-delà de 600 mètres. Aucun apport en tritium n'a été observé en limite des eaux territoriales, comme le montre la similitude entre les profils à l'est et à l'ouest de Mururoa et au large de Tahiti.

Les activités mesurées sont cohérentes avec les données scientifiques contemporaines disponibles, en particulier celles de la campagne océanographique «*Benthic 8*» réalisée en 1983. Bien que l'extension méridionale de cette campagne ait été limitée à 10° S (Tahiti est à 18° S et Mururoa à 22° S), les activités et les profils publiés sont similaires à ceux obtenus en 1988.

V.5.2 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE SUPÉRIEURE À 5 ANS

Les ^{137}Cs et ^{90}Sr étaient présents dans les eaux de mer de surface sur l'ensemble de la planète, dès le début des années 60, à la suite des retombées mondiales résultant des essais atmosphériques réalisés dans les deux hémisphères. Ces radionucléides ont fait l'objet d'un suivi annuel dans les eaux de surface de l'ensemble de la Polynésie qui a montré, entre 1987 et 1994, une décroissance lente de l'activité volumique de ces eaux (Tableau 46).

TABLEAU 46.
Activités volumiques (Bq.m^{-3}) moyennes en ^{137}Cs et ^{90}Sr des eaux océaniques de surface prélevées, de 1987 à 1994, sur l'ensemble de la Polynésie française.
Le nombre de points de prélèvements est donné entre parenthèses.

Année	^{137}Cs (Bq.m^{-3})		^{90}Sr (Bq.m^{-3})	
1987	3,17 ± 0,50	*(11)*		
1988	2,66 ± 0,23	*(11)*		
1989	2,45 ± 0,08	*(11)*	1,65 ± 0,09	*(5)*
1990	2,64 ± 0,14	*(11)*	1,49 ± 0,22	*(11)*
1991	2,22 ± 0,10	*(11)*	1,54 ± 0,10	*(8)*
1992	2,15 ± 0,06	*(7)*	1,34 ± 0,06	*(7)*
1993	2,15 ± 0,11	*(11)*	1,35 ± 0,11	*(11)*
1994	2,12	*(1)*	1,17	*(1)*

Les profils de l'activité volumique du ^{137}Cs et du ^{90}Sr en fonction de la profondeur réalisés en 1993, au large de Tahiti, montraient des évolutions très proches, avec une différence marquée des activités volumiques entre les eaux de surface et de fond. Ainsi, les eaux de la couche de surface, entre 0 et 150 mètres environ, présentaient une activité volumique homogène de 2,1 Bq.m^{-3} et 1,4 Bq.m^{-3}, respectivement pour le ^{137}Cs et le ^{90}Sr. Les niveaux décroissaient rapidement à partir de la thermocline jusqu'à environ 800 mètres de profondeur. De cette profondeur et jusqu'aux couches d'eaux les plus profondes, les activités volumiques du ^{137}Cs et du ^{90}Sr étaient constantes et à des niveaux très faibles, inférieurs à 0,1 Bq.m^{-3} et 0,2 Bq.m^{-3}, respectivement (Fig. 172).

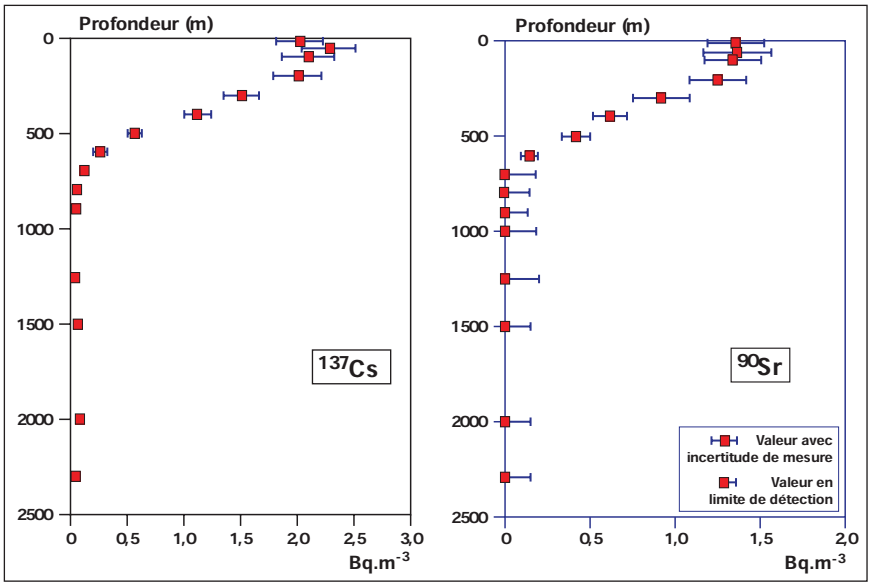


FIG. 172. - Profils verticaux de l'activité volumique (Bq.m^{-3}) en ^{137}Cs et ^{90}Sr des masses d'eaux océaniques prélevées à différentes profondeurs, en 1993, à proximité de l'île de Tahiti. *Les incertitudes de mesure sont données à 2 σ.*

V.5.3 - ISOTOPES DU PLUTONIUM

L'activité volumique du $^{239+240}$Pu des eaux océaniques polynésiennes prélevées en 1989-1996 était comprise entre 0,001 et 0,002 Bq.m^{-3} (Fig. 173). À la limite des eaux territoriales, les activités volumiques en plutonium, bien que déjà très faibles, étaient supérieures d'un facteur 2 à celles des eaux océaniques polynésiennes, avec des variations importantes d'une année de prélèvement à l'autre ; variations dues aux fluctuations des courants entraînant les eaux en sortie des lagons de Mururoa et Fangataufa vers le large.

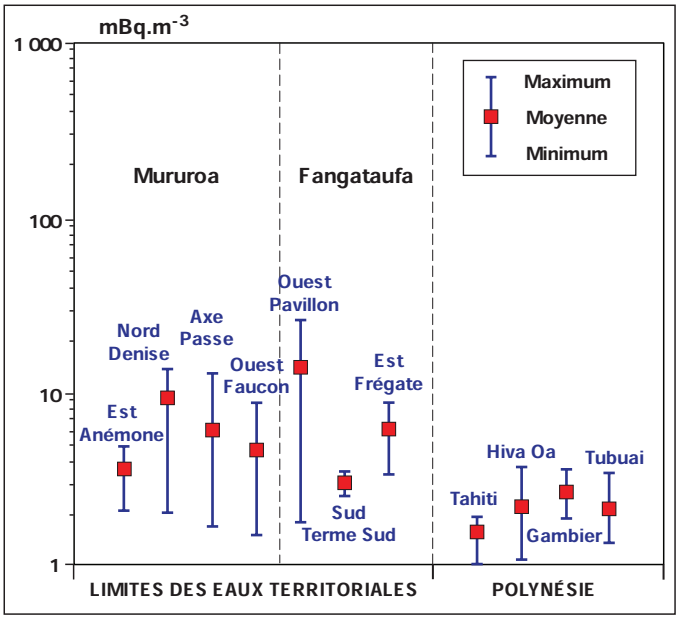


FIG. 173. - Amplitude de variation de l'activité volumique (mBq.m^{-3}) des eaux océaniques de surface, prélevées à proximité de différentes îles polynésiennes et à différentes stations à la limite des eaux territoriales de Mururoa et Fangataufa, référencées au droit des zones d'expérimentations des atolls.

La distribution verticale du $^{239+240}$Pu, dans les différentes masses d'eau présentes en Polynésie, a été précisée sur des échantillons de grands volumes d'eau prélevés en 1993, à différentes profondeurs, au large de Tahiti (Fig. 174). L'activité volumique apparaissait constante dans la couche de surface, de l'ordre de 2 mBq.m^{-3}, augmentait progressivement à partir de 200 mètres de profondeur, pour atteindre un maximum de 10 mBq.m^{-3} aux environs de 600 mètres, avant de diminuer rapidement jusqu'à 1 000 mètres, puis de décroître plus lentement au-delà. Le maximum observé à 600 m de profondeur était le résultat de la lente sédimentation dans la colonne d'eau du plutonium issu des retombées mondiales résultant de l'ensemble des essais atmosphériques mondiaux.

Cette distribution verticale a été observée, sur l'ensemble des mers du globe et s'explique par la migration progressive du plutonium, de la surface des océans vers les grands fonds, à raison de 20 à 30 mètres par an.

Les activités volumiques en ^{238}Pu étaient rarement détectables dans les eaux océaniques.

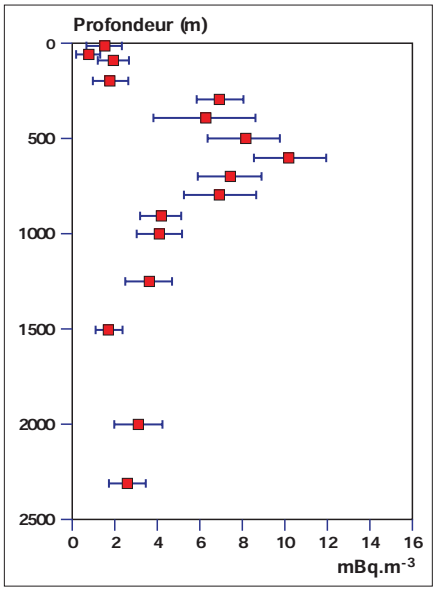


FIG. 174. - Profils de l'activité volumique en $^{239+240}$Pu des eaux prélevées, en 1993, entre la surface et 2 500 m de profondeur, à proximité de Tahiti. *Les incertitudes de mesure sont données à 2 σ.*

V.5.4 - RADIOACTIVITÉ DES EAUX DE MER MONDIALES

Des échantillons d'eau de mer de surface des différents océans de la planète ont été prélevés, en 1992-1993, afin de comparer leurs niveaux d'activité volumique en ^{90}Sr, ^{137}Cs et $^{239+240}Pu$ avec ceux observés en Polynésie. Les résultats de cette campagne ont montré que les activités volumiques de ces radionucléides dans les eaux de surface polynésiennes étaient identiques ou inférieures à celles des eaux océaniques de l'hémisphère Nord (Fig. 175).

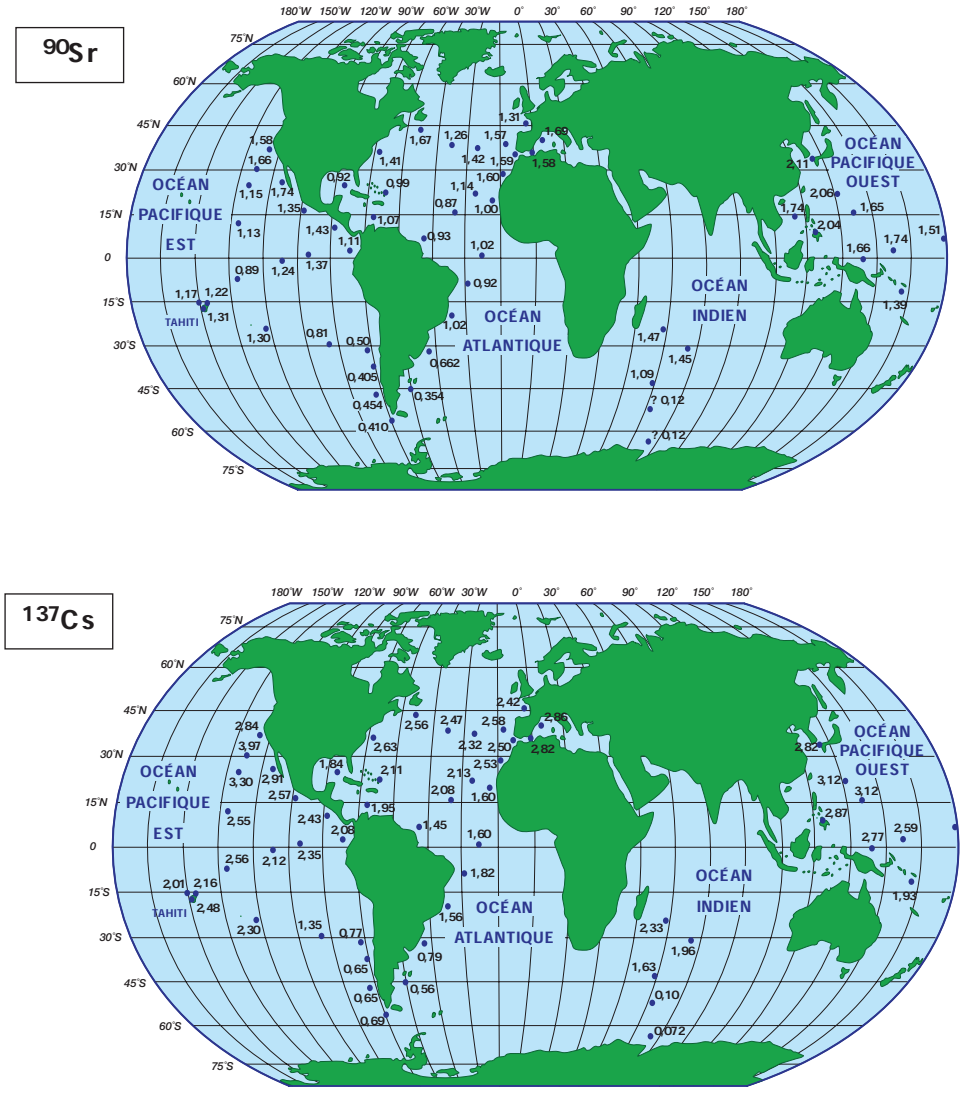


FIG. 175. - Activité volumique en ^{90}Sr et ^{137}Cs ($Bq.m^{-3}$) des masses d'eau de surface prélevées en 1992-1993 dans les différents océans de la planète.

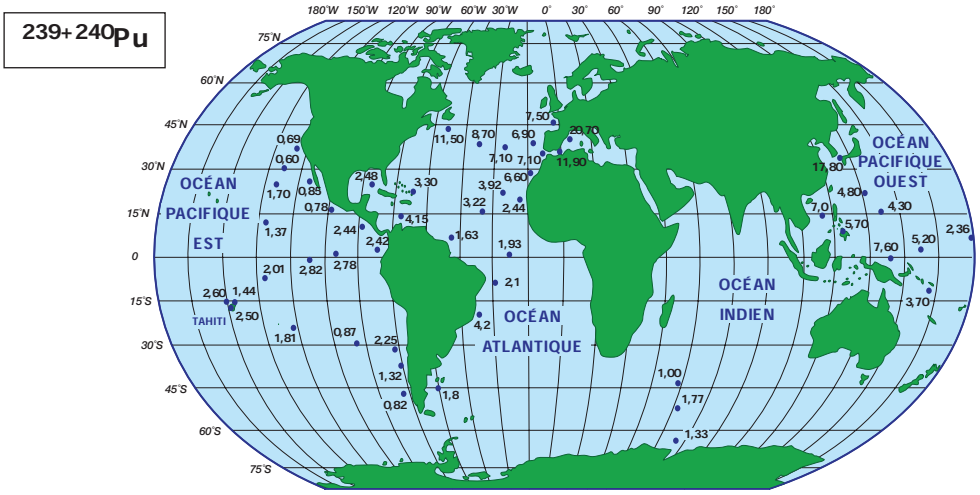


FIG. 175 (suite). - Activité volumique en $^{239+240}Pu$ ($mBq.m^{-3}$) des masses d'eau de surface prélevées en 1992-1993 dans les différents océans de la planète.

V.6 - FLORE ET FAUNE MARINES

Parmi l'ensemble des résultats de mesure disponibles pour les organismes vivant en Polynésie sujets de la surveillance radiologique, ceux appartenant au niveau trophique primaire, à savoir le plancton, et ceux du niveau trophique le plus élevé, celui des carnivores marins que sont les poissons pélagiques océaniques, seront présentés dans ce paragraphe.

V.6.1 - PLANCTON

Le plancton accumule les radionucléides d'origines naturelle et artificielle à des niveaux d'activité massique importants. Ainsi, pour ceux d'origine naturelle, notamment le ^{234}Th (330 $Bq.kg^{-1}$ frais), les facteurs de concentration (Fc) à partir des eaux de mer sont de l'ordre de 400 000 et de 10 000, respectivement dans le phytoplancton et le zooplancton. À la limite des eaux territoriales de Mururoa et de Fangataufa, cette radioactivité naturelle est environ cinq mille fois plus élevée que la radioactivité d'origine artificielle (Fig. 176).

Concernant les radionucléides d'origine artificielle, ce sont essentiellement les ^{60}Co, ^{137}Cs et $^{239+240}Pu$ qui ont été quantifiés. En effet, le plancton se caractérise par des capacités d'accumulation variables suivant les radionucléides, reflétées par les valeurs génériques de Fc recommandées par l'AIEA (cf. Chapitre II). Ainsi, le césium est faiblement accumulé par le phytoplancton et le zooplancton, avec des Fc de 20 et de 40, respectivement. Au contraire, le cobalt et le plutonium s'accumulent dans le plancton, l'AIEA a publié des valeurs de Fc de 2 000 et de 200 000 pour le phytoplancton et de 7 000 et de 4 000 pour le zooplancton. Pour les poissons, les Fc associés au césium, cobalt et plutonium sont respectivement, de 100, 700 et 100.

Les principaux radionucléides d'origine artificielle mis en évidence dans le plancton océanique sont le ^{60}Co, le ^{137}Cs, le ^{238}Pu et le $^{239+240}Pu$ (Fig. 177).

Le strontium, caractérisé par des Fc de 1 et de 2 respectivement dans le phytoplancton et le zooplancton, n'est donc pas accumulé par les organismes composant le plancton. Aussi, il n'est pas étonnant que le ^{90}Sr, à de faibles niveaux d'activité volumique dans les eaux de mer de l'ordre de 1,3 $Bq.m^{-3}$, n'ait pas été décelé dans les échantillons de plancton.

V.6.1.1 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE SUPÉRIEURE À 5 ANS

En raison des échanges lagon-océan par l'intermédiaire des passes, le ^{60}Co initialement présent dans les eaux du lagon a été décelé dans les eaux océaniques proches des atolls d'expérimentations, jusqu'à la limite

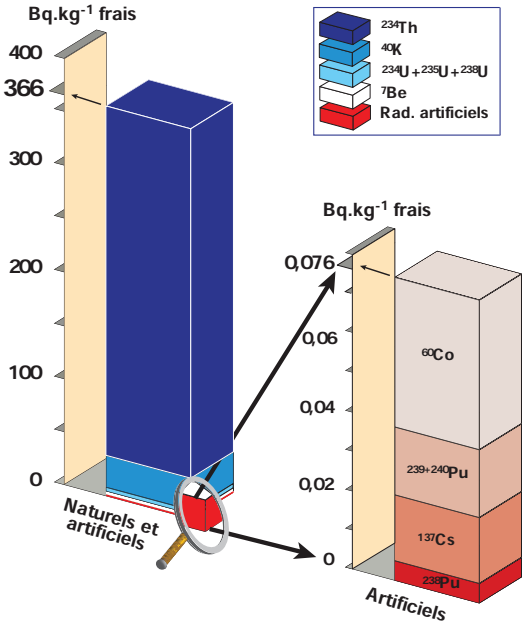


FIG. 176. - Activité massique ($Bq.kg^{-1}$ frais) des radionucléides d'origine naturelle et artificielle du plancton océanique collecté dans les eaux de surface, à la limite des eaux territoriales des atolls de Mururoa et Fangataufa.

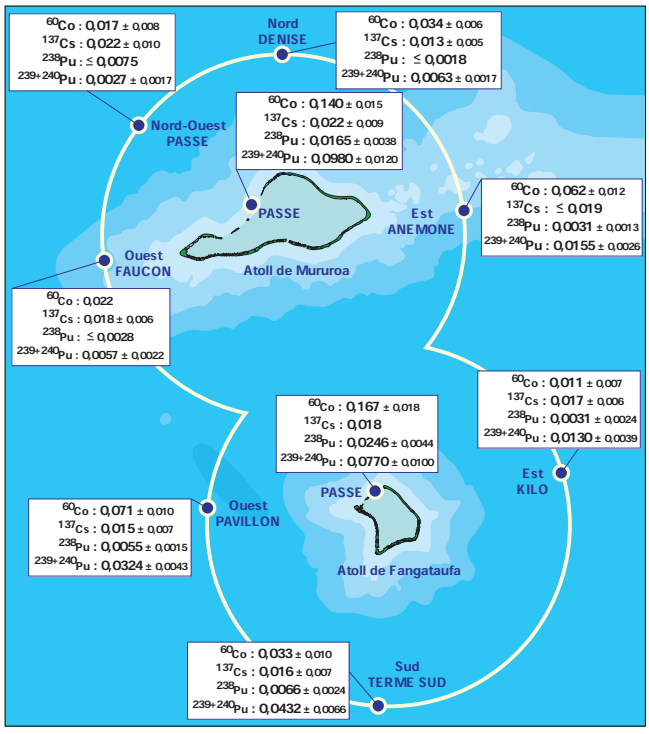


FIG. 177. - Activités massiques ($Bq.kg^{-1}$ frais) en ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$ mesurées sur des échantillons de plancton prélevés en 1993-1994 à la limite des eaux territoriales des atolls de Mururoa et Fangataufa.

des eaux territoriales. De même, l'activité massique du plancton était plus élevée au voisinage des passes qu'au large (Fig. 177). À partir de 1993, des niveaux d'activités plus faibles ont été mesurés à l'aide de détecteurs bas bruit de fond très performants installés dans le laboratoire souterrain de Modane (Savoie, France). Ces mesures faisaient apparaître une diminution de l'activité massique du ^{60}Co, en moyenne d'un facteur quatre, des passes aux 12 milles nautiques des côtes de Mururoa et de Fangataufa (Fig. 178). En revanche, le ^{60}Co n'a pas été détecté dans le plancton prélevé dans les eaux à proximité des autres atolls de la Polynésie française.

Le ^{137}Cs, faiblement accumulé par le plancton océanique, est également mesuré depuis 1993 dans le laboratoire souterrain de Modane. Le ^{137}Cs apparaît à des niveaux constants compris entre 0,015 ± 0,07 et 0,022 ± 0,010 $Bq.m^{-3}$ sur l'ensemble des points de prélèvement, traduisant l'homogénéité de l'activité volumique des eaux polynésiennes, conséquence des retombées atmosphériques mondiales (Fig. 178).

V.6.1.2 - ISOTOPES DU PLUTONIUM

Quelle que soit la période de prélèvement, les activités volumiques en ^{238}Pu et en $^{239+240}Pu$, étaient, comme pour le ^{60}Co, toujours plus élevées dans les échantillons de plancton collectés à proximité des passes que dans ceux prélevés au large. Entre ces deux zones, l'activité volumique diminuait en moyenne d'un facteur cinq pour le ^{238}Pu, de 0,0206 à 0,0046 $Bq.kg^{-1}$ frais, et pour le $^{239+240}Pu$, de 0,0875 à 0,0170 $Bq.kg^{-1}$ frais.

L'activité massique du ^{238}Pu du plancton prélevé dans les eaux territoriales était inférieure aux limites de détection alors que l'activité en $^{239+240}Pu$ était comprise entre 0,0016 et 0,0090 $Bq.kg^{-1}$ frais, avec une moyenne de 0,0050 $Bq.kg^{-1}$ frais (Fig. 178). Ces valeurs étaient proches de la valeur minimale de l'amplitude des niveaux attendus suite aux retombées atmosphériques mondiales. En effet, sur la base des résultats des mesures obtenus en 1972-1973 entre 15° et 30° de latitude Sud, l'AIEA fixait à cette date les activités probables entre 0,003 et 0,034 $Bq.kg^{-1}$ frais.

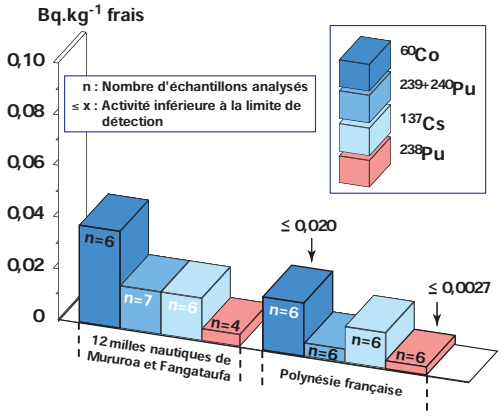


FIG. 178. - Activité volumique ($Bq.kg^{-1}$ frais) moyenne en ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{238}Pu et $^{239+240}Pu$ du plancton océanique prélevé, en 1993-1994, à la limite des eaux territoriales de Mururoa et de Fangataufa et des autres îles de Polynésie française.

Lorsque l'activité massique du ^{238}Pu a été quantifiée, les rapports $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ étaient de 32 % et de 17 %, respectivement dans les passes de Fangataufa et de Mururoa, proches de ceux des eaux du lagon de Fangataufa (35 %) et de Mururoa (16 %).

Facteurs de concentration du plancton polynésien

Les données obtenues pour les eaux de mer et le plancton, prélevés simultanément lors des campagnes de 1993 et de 1994, permettent de calculer des facteurs de concentration du ^{137}Cs et du $^{239+240}Pu$ spécifiques du plancton vivant dans les eaux polynésiennes (Tableau 47).

Le Fc du ^{137}Cs pour le plancton océanique varie de 6 à 14, confirmant le faible pouvoir d'accumulation du césium par le plancton. Le Fc varie de 4,5 à 7,4 lorsqu'il est calculé avec les résultats obtenus sur les échantillons issus des archipels de Polynésie française (Marquises, Tahiti, Tuamotu-Gambier et Australes). Ces valeurs pour le plancton polynésien sont du même ordre de grandeur, mais inférieures aux valeurs génériques recommandées par l'AIEA.

Le Fc du $^{239+240}Pu$ pour le plancton polynésien oscille entre 1 900 et 5 000, confirmant le fort pouvoir d'accumulation de cet élément. Ces valeurs sont inférieures à celles recommandées par l'AIEA. En revanche, elles sont très proches du Fc de 4 000 obtenu à partir des mesures réalisées par les différents laboratoires lors de l'intercomparaison organisée par AIEA en 1991.

TABLEAU 47.
Facteurs de concentration (Fc) du ^{137}Cs et $^{239+240}Pu$ pour le plancton polynésien, calculés à partir des résultats de mesure de l'intercomparaison AIEA de 1991 et des campagnes de prélèvements de 1993-1994. *Le nombre de mesures utilisé pour le calcul est donné entre parenthèses.*

Radionucléide	Facteur de concentration AIEA *Valeurs mini - maxi* (Valeur recommandée *)	Facteur de concentration Intercomparaison 1991	Facteur de concentration (Fc) Campagnes 1993 - 1994		
			minimum	moyen	maximum
^{137}Cs	*10 - 50* : 30 *	14 *(2)*	4,5	5,6 *(5)*	7,4
$^{239+240}Pu$	*500 - 5 000* : 1 000 *	4 000 *(2)*	1 900	3 200 *(5)*	5 000

V.6.2 - POISSONS PÉLAGIQUES

Depuis 1966, date du début des essais nucléaires sur les atolls de Mururoa et Fangataufa, la radioactivité des denrées entrant dans la ration alimentaire des populations vivant en Polynésie est régulièrement contrôlée. Le poisson constitue la base de l'apport en protéines dans leur alimentation. Des consommations annuelles pouvant atteindre 140 kg par adulte, dont 30 kg de thon, ont été relevées lors des enquêtes alimentaires réalisées jusqu'en 1985, en particulier dans l'archipel des Gambier. Ces quantités sont supérieures à celles consommées à la même époque par les pêcheurs du Nord de la France par exemple (17,3 kg.adulte^{-1}.an^{-1}). Aussi, depuis 1966, une attention particulière a été accordée aux grands poissons pélagiques océaniques pêchés dans la Zone économique exclusive (ZEE) de Polynésie française. Les résultats obtenus sont utilisables pour estimer la dose engagée du fait de la consommation de ces espèces (cf. Chapitre VI).

V.6.2.1 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE INFÉRIEURE OU ÉGALE À L'ANNÉE

Pendant la période des essais atmosphériques, entre 1967 et 1974, parmi les radionucléides du cortège mis en évidence lors d'un essai (cf. Chapitres II et IV), le ^{65}Zn est celui de période courte le plus souvent mesuré chez les poissons. Le Fc du ^{65}Zn pour les poissons, donné dans différentes publications scientifiques, est élevé, de l'ordre de 1 000. Sur un ensemble de 4 700 échantillons analysés, 65 % ont conduit à une activité massique quantifiable. Les activités massiques les plus élevées ont été observées, en 1967 et 1968, en particulier pour *Acanthocybium solandri*, le thazard, espèce qui ne semble pas effectuer de grandes migrations (Tableau 48). Un marquage significatif en ^{65}Zn a été mis en évidence, de janvier à août 1968, dans la zone de pêche proche des sites de Mururoa et de Fangataufa.

À partir de 1969, les activités massiques ont décru régulièrement pour n'être plus quantifiables à partir de 1975. L'évolution temporelle de l'activité massique en ^{65}Zn de *Gymnosarda unicolor*, entre 1967 et 1974, illustre la décroissance de ce radionucléide dans la chair des poissons pélagiques dès l'arrêt des essais atmosphériques sur barge (Fig. 179). La période de décroissance effective calculée était de 362 jours, supérieure à la valeur de la période radioactive de 244 jours, révélant des apports réguliers de ^{65}Zn durant cette période.

TABLEAU 48.
Évolution, au cours du temps de l'activité massique moyenne (Bq.kg^{-1} frais) en ^{65}Zn, dans les six principales espèces de poissons pélagiques océaniques pêchées entre 1967 et 1974.
Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de mesures supérieures aux limites de détection qui ont été prises en compte pour le calcul de la moyenne annuelle.

Année	^{65}Zn (Bq.kg^{-1} frais)											
	Thazard		Albacore		Germon		Bonite		Gymnosarde		Patudo	
1967	25	*(29)*	110	*(79)*	17	*(18)*	520	*(92)*	63	*(12)*	-	
1968	1 600	*(20)*	89	*(133)*	18	*(55)*	15	*(436)*	41	*(99)*	28	*(20)*
1969	20	*(51)*	16	*(125)*	7,2	*(156)*	5,7	*(300)*	18	*(69)*	2,8	*(32)*
1970	2,3	*(21)*	2,6	*(44)*	1,2	*(48)*	2,7	*(244)*	14	*(55)*	1,1	*(29)*
1971	1,8	*(33)*	3,0	*(50)*	1,0	*(23)*	2,2	*(257)*	2,7	*(26)*	1,1	*(23)*
1972	1,0	*(26)*	1,6	*(86)*	0,62	*(21)*	1,2	*(127)*	1,8	*(29)*	0,71	*(15)*
1973	0,62	*(16)*	0,51	*(28)*	0,47	*(13)*	0,57	*(83)*	0,66	*(9)*	0,46	*(8)*
1974	0,41	*(5)*	0,50	*(2)*	-		0,68	*(10)*	0,93	*(8)*	-	

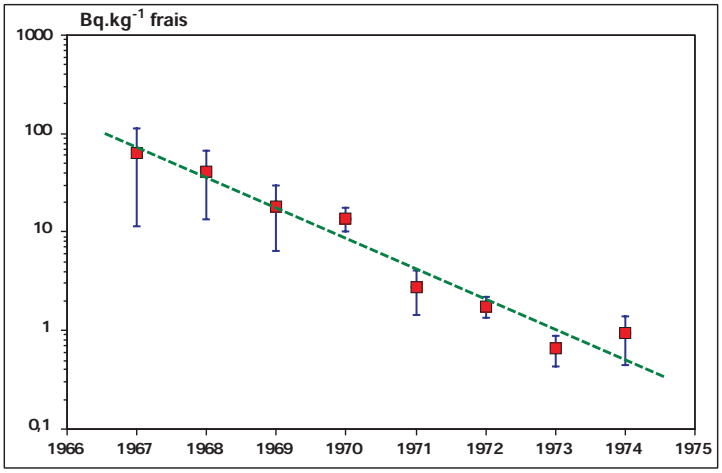


FIG. 179. - Évolution de l'activité massique (Bq.kg^{-1} frais) moyenne (incertitude à 2σ) en ^{65}Zn dans la chair des échantillons de *Gymnosarda unicolor* pêchés de 1967 à 1974 en Polynésie française.

La distribution spatiale des résultats d'activité massique du ^{65}Zn dans les poissons pélagiques montre également une décroissance de l'activité massique, en fonction de la distance, entre les zones de pêche et les sites d'expérimentations (Tableau 49). Néanmoins, lors des premières années de la surveillance, des activités massiques atteignant quelques centaines de Bq.kg^{-1} frais ont été occasionnellement mesurées sur des poissons appartenant à des espèces migratrices et pêchés en dehors de la zone la plus proche des sites d'expérimentations.

Le mode de vie des poissons influence également les niveaux d'activité massique de la chair des poissons pélagiques (Tableau 49). Ainsi, l'activité massique moyenne en ^{65}Zn s'avérait nettement plus faible pour les espèces vivant en eaux profondes (germon et patudo) que pour les espèces vivant dans les eaux de surface (thazard, bonite et gymnosarde). De même, les activités massiques des thons de l'espèce *albacore* se trouvaient certainement influencées par les fluctuations dans la composition de l'échantillon de cette population : mélange de jeunes individus pêchés à la traîne en surface et d'adultes capturés en profondeur par des longues lignes (cf. Chapitre III).

TABLEAU 49.
Activités massiques (Bq.kg^{-1}) en ^{65}Zn dans la chair des différentes espèces de poissons pélagiques pêchés entre 1967 et 1974 en fonction de l'éloignement des sites d'expérimentations.
Les distances correspondent aux zones au large de Mururoa et Fangataufa (< 100 km), Tuamotu Centre - Sud Gambier (100-700 km), Tuamotu Nord - Tahiti - Australes Sud (700-1 300 km), Marquises - Îles sous le Vent -Australes Nord (> 1 300 km).
Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de résultats de mesure significatifs.

Distance des sites (km)	^{65}Zn (Bq.kg^{-1} frais)											
	Thazard		Albacore		Germon		Bonite		Gymnosarde		Patudo	
Inférieure à 100	1 300	*(26)*	180	*(51)*	54	*(14)*	1 900	*(24)*	130	*(64)*	0,50	*(2)*
100 à 700	5,5	*(119)*	24	*(140)*	8,3	*(40)*	34	*(102)*	13	*(236)*	0,97	*(23)*
700 à 1 300	6,6	*(50)*	32	*(281)*	5,4	*(224)*	5,9	*(1 386)*	2,4	*(7)*	6,8	*(89)*
Supérieure à 1 300	6,4	*(6)*	11	*(75)*	3,8	*(56)*	26	*(37)*	11	*(1)*	7,0	*(13)*

Les autres radionucléides à vie courte, les plus fréquemment mesurés, sont les ^{57}Co, ^{58}Co et ^{54}Mn. Les valeurs étaient très dispersées avec des *maxima* apparaissant surtout dans les années 1967 et 1968 (Tableau 50). Les autres radionucléides tels que les ^{95}Zr, ^{131}I, ^{140}Ba, ^{141}Ce, ^{103}Ru, ^{110m}Ag, ^{144}Ce et ^{106}Ru ont également été mesurés épisodiquement, principalement entre 1967 et 1970.

TABLEAU 50.
Évolution au cours du temps de l'activité massique maximale (Bq.kg^{-1} frais) en ^{57}Co, ^{58}Co, ^{60}Co et ^{54}Mn dans les six principales espèces de poissons pélagiques océaniques pêchées entre 1967 et 1974.

Espèces		Thazard	Albacore	Germon	Bonite	Gymnosarde	Patudo
Lieux		Mururoa	Fangataufa	Tahiti	Mururoa	Mururoa	Marquises
Dates		1968	1967	1968	1967	1968	1968
Activités maximales (Bq.kg^{-1} frais)	^{57}Co	1 800	290	8,4	8 400	1 200	-
	^{58}Co	180	240	-	2 700	440	8,1
	^{60}Co	620	670	150	1 300	200	8,8
	^{54}Mn	230	250	-	1 400	400	11

V.6.2.2 - RADIONUCLÉIDES DE PÉRIODE SUPÉRIEURE À 5 ANS

Parmi les radionucléides caractérisés par une période supérieure à 5 ans, le ^{60}Co et principalement le ^{137}Cs ont régulièrement été quantifiés dans les poissons pélagiques. En effet, le ^{137}Cs, par exemple, a été détecté dans la chair de 5 200 poissons océaniques péchés entre 1967 et 1993 dans la ZEE de Polynésie française (Tableaux 50 et 51).

L'analyse statistique montre que, pour cette période, 91 % des valeurs d'activité massique étaient inférieures ou égales à 1 Bq.kg $^{-1}$ frais, 8 % étaient comprises entre 1 et 5 Bq.kg^{-1} frais et seulement 1 % étaient supérieures à 10 Bq.kg^{-1} frais.

TABLEAU 51.
Évolution au cours du temps de l'activité massique moyenne (Bq.kg^{-1} frais) en ^{137}Cs dans les six principales espèces de poissons pélagiques océaniques pêchées entre 1967 et 1993.
Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de mesures supérieures aux limites de détection prises en compte pour le calcul de la valeur annuelle.

Année	^{137}Cs (Bq.kg^{-1} frais)											
	Thazard		Albacore		Germon		Bonite		Gymnosarde		Patudo	
1967	2,8	(17)	2,7	(56)	3,4	(9)	12,00	(22)	1,8	(10)	-	(-)
1968	3,7	(13)	3,2	(52)	1,8	(33)	1,20	(91)	9,2	(93)	1,1	(10)
1969	1,3	(23)	2,3	(29)	1,5	(39)	0,57	(30)	2,0	(58)	1,0	(8)
1970	0,68	(34)	0,61	(76)	0,54	(74)	0,61	(155)	2,4	(60)	0,48	(38)
1971	0,98	(41)	0,94	(61)	0,55	(49)	0,61	(242)	1,1	(48)	0,60	(57)
1972	0,72	(29)	0,69	(110)	0,46	(32)	0,66	(135)	0,81	(30)	0,69	(18)
1973	0,80	(44)	0,56	(102)	0,54	(61)	0,59	(198)	0,95	(27)	0,57	(22)
1974	0,85	(90)	0,54	(147)	0,51	(39)	0,58	(258)	1,1	(100)	0,70	(22)
1975	0,62	(58)	0,57	(49)	0,33	(9)	0,44	(41)	0,71	(39)	0,27	(10)
1976	0,72	(46)	0,49	(93)	0,45	(22)	0,62	(70)	0,79	(40)	0,40	(28)
1977	0,53	(60)	0,42	(112)	0,34	(13)	0,51	(70)	0,59	(23)	0,39	(7)
1978	0,63	(38)	0,42	(68)	0,30	(5)	0,46	(69)	0,73	(17)	0,37	(8)
1979	0,42	(43)	0,41	(62)	0,20	(10)	0,44	(50)	0,57	(31)	0,41	(4)
1980	0,42	(35)	0,24	(36)	0,19	(4)	0,41	(10)	0,52	(34)	0,31	(6)
1981	0,34	(24)	0,28	(23)	0,18	(10)	0,49	(8)	0,56	(6)	0,22	(8)
1982	0,31	(23)	0,24	(22)	0,15	(9)	0,56	(4)	0,37	(7)	0,31	(10)
1983	0,33	(38)	0,19	(27)	0,23	(11)	-	(-)	0,40	(16)	0,34	(2)
1984	0,40	(62)	0,29	(41)	0,21	(7)	-	(-)	0,61	(35)	-	(-)
1985	0,45	(12)	0,36	(10)	0,23	(6)	0,37	(1)	0,50	(20)	-	(-)
1986	0,33	(30)	0,27	(33)	0,16	(4)	-	(-)	0,51	(14)	0,33	(3)
1987	0,33	(39)	0,23	(20)	0,19	(8)	-	(-)	0,54	(25)	0,26	(2)
1988	0,36	(19)	0,30	(16)	0,29	(4)	0,20	(3)	0,48	(10)	0,44	(3)
1989	0,43	(33)	0,23	(15)	0,31	(1)	0,25	(19)	0,41	(14)	0,27	(1)
1990	0,39	(24)	0,26	(18)	-	(-)	0,33	(20)	0,21	(3)	0,07	(1)
1991	0,31	(24)	0,23	(12)	0,20	(3)	0,32	(9)	0,33	(16)	0,29	(3)
1992	0,36	(13)	0,32	(7)	0,39	(2)	0,37	(7)	0,60	(1)	-	(-)
1993	-	(-)	-	(-)	-	(-)	0,50	(1)	0,40	(2)	-	(-)

Les activités massiques les plus élevées ont été observées entre 1967 et 1969 (Fig. 180). De l'ordre d'une dizaine de Bq.kg^{-1} frais pour la gymnosarde et la bonite, elles ne dépassaient pas 4 Bq.kg^{-1} frais pour les quatre autres espèces de poissons pélagiques. L'évolution au cours du temps montre une décroissance rapide de l'activité moyenne annuelle, entre 1967 et 1974, puis une diminution plus lente jusqu'à nos jours. Dès 1974, année de l'arrêt des essais atmosphériques, l'activité massique en ^{137}Cs ne représentait plus que quelques dixièmes de Bq.kg^{-1} frais, valeur légèrement inférieure à celles mesurées dès 1996 dans la chair de thon de l'Atlantique et de la Méditerranée, de 0,7 à 0,8 Bq.kg^{-1} frais.

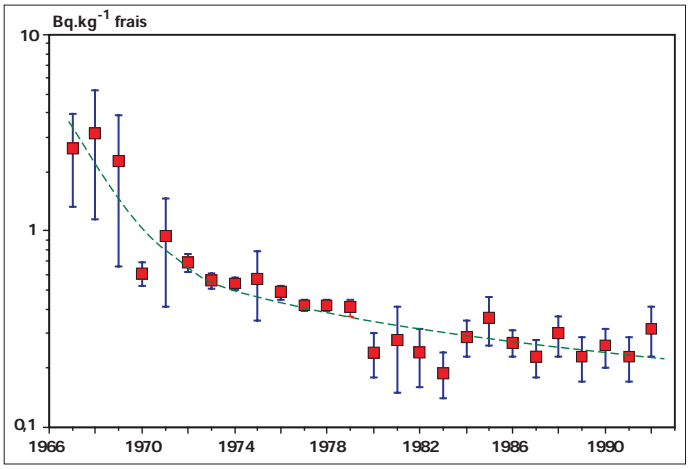


FIG. 180. - Évolution de l'activité massique (Bq.kg^{-1}) moyenne (écart-type associé) en ^{137}Cs dans la chair des échantillons de thons de l'espèce *albacore* pêchés, de 1967 à 1992, en Polynésie française.

Comme pour le ^{65}Zn, les activités massiques moyennes en ^{137}Cs décroissaient avec l'éloignement des sites de Mururoa et Fangataufa et étaient inférieures pour les espèces vivant en profondeur, germon et patudo, par rapport à celles vivant en surface, bonite et gymnosarde (Tableau 52).

TABLEAU 52.
Activités massiques (Bq.kg^{-1}) en ^{137}Cs dans la chair des différentes espèces de poissons pélagiques pêchés entre 1967 et 1974 en fonction de l'éloignement des sites d'expérimentations.
Les distances correspondent aux zones au large de Mururoa et Fangataufa (< 100 km), Tuamotu Centre - Sud Gambier (100-700 km), Tuamotu Nord - Tahiti - Australes Sud (700-1 300 km), Marquises - Îles sous le Vent -Australes Nord (> 1 300 km).
Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de résultats significatifs.

Distance des sites (km)	^{137}Cs (Bq.kg^{-1} frais)											
	Thazard		Albacore		Germon		Bonite		Gymnosarde		Patudo	
Inférieure à 100	1,3	*(88)*	2,4	*(100)*	1,1	*(38)*	8,5	*(27)*	6,9	*(155)*	0,42	*(18)*
100 à 700	0,64	*(509)*	0,57	*(346)*	0,43	*(94)*	0,78	*(169)*	0,81	*(500)*	0,53	*(77)*
700 à 1 300	0,59	*(129)*	0,61	*(599)*	0,77	*(242)*	0,61	*(1 256)*	0,56	*(40)*	0,60	*(98)*
Supérieure à 1 300	0,47	*(186)*	0,56	*(252)*	0,58	*(90)*	0,63	*(62)*	0,47	*(84)*	0,48	*(78)*

V.6.2.3 - ISOTOPES DU PLUTONIUM

Les isotopes du plutonium ont très rarement été quantifiés dans la chair des poissons pélagiques de haute mer. Les niveaux d'activité étaient pour la plupart inférieurs aux limites de détection des techniques de mesure utilisées. Dans les années 1990, l'amélioration des techniques d'analyse a permis d'atteindre le niveau des traces d'activité pour ces radionucléides.

Grâce à l'amélioration des limites de détection, des résultats significatifs ont été obtenus sur un faible nombre d'échantillons, tous issus des poissons pêchés au large des atolls de Mururoa et de Fangataufa (Tableau 53).

Le Fc du plutonium pour les poissons pélagiques polynésiens, calculé à partir des activités des masses d'eau et des poissons prélevés simultanément, est de l'ordre de 50, proche de la valeur générique préconisée par l'AIEA (100), démontrant la cohérence des données de surveillance.

TABLEAU 53.
Activités massiques (Bq.kg^{-1} frais) minimale et maximale en $^{239+240}$Pu dans la chair des poissons pêchés, de 1990 à nos jours, à proximité des sites de Mururoa et Fangataufa.

Espèce	$^{239+240}$Pu (Bq.kg^{-1} frais)			
	Minimum	Maximum	Nombre de mesures significatives	Nombre total de mesures
Bonite	**0,0022**	**0,0078**	***(3)***	***(144)***
Albacore	**0,0020**	**0,0132**	***(3)***	***(180)***
Gymnosarde	**0,0007**	**0,0133**	***(7)***	***(80)***

V.7 - CONCLUSION

La surveillance radiologique réalisée au début des années soixante sur différentes composantes de l'environnement polynésien montre l'existence d'un bruit de fond significatif pour les différents radionucléides d'origine artificielle provenant des retombées des essais nucléaires réalisés dans l'atmosphère par les États-Unis, l'URSS et le Royaume-Uni, dont certains ont eu lieu dans le Pacifique Sud. Par la suite, l'influence sur le territoire polynésien des retombées régionales et mondiales des essais réalisés à partir de 1966 sur les atolls de Mururoa et Fangataufa s'est essentiellement limitée à la période des essais atmosphériques. Ainsi, l'évolution au cours du temps de la radioactivité des aérosols suit une tendance générale à la baisse de 1966 à 1975, année où les niveaux redeviendront inférieurs à ceux du début des années soixante. Sur cette tendance, se sont superposées des fluctuations annuelles marquées, résultant à la fois des campagnes d'essais réalisées uniquement pendant l'hiver austral pour profiter de conditions météorologiques favorables à la dispersion du nuage radioactif et de l'épuration rapide du milieu atmosphérique pendant l'été austral. Les niveaux d'activité volumique des principaux radionucléides dans l'atmosphère étaient comparables, ou inférieurs, à ceux observés dans l'hémisphère Nord, en particulier sur le territoire métropolitain.

Cependant, suite aux essais Aldébaran, Rigel, Arcturus, Encelade, Phoebé et Centaure, des retombées supérieures aux niveaux attendus ont été détectées dans l'atmosphère des îles de Mangareva, Tureia et Tahiti. Ces détections déclenchèrent des contrôles radiologiques complémentaires, avec des fréquences de prélèvement plus importantes des principaux constituants de la chaîne alimentaire de l'île affectée par les retombées. De plus, dans chacun de ces cas, des calculs de doses pour les populations concernées ont été réalisés au moment des retombées et ont fait l'objet d'une réactualisation en 2005-2006 ; leurs résultats sont présentés dans le chapitre VI.

Les dépôts sur les sols des îles polynésiennes ont donc intégré, au cours du temps, les retombées régionales et mondiales des radionucléides générés par les essais réalisés durant la décennie 1950-1960, puis les retombées des essais français pour la période 1966-1974, en particulier celles des 6 essais mentionnés précédemment, et enfin les retombées chinoises jusqu'en 1981. Néanmoins, par l'action conjointe du lessivage par les eaux de pluie des radionucléides déposés sur les sols et de leur migration vers des horizons plus profonds, l'activité massique des radionucléides présents dans les sols a décru plus rapidement au cours du temps que par le simple fait de la décroissance radioactive de ces radionucléides. En conséquence, la contribution de la composante tellurique des sols, en particulier des sols coralliens, au débit de dose ambiant des îles est généralement faible et inférieure à celle de la majorité des sols métropolitains et ce, en raison des niveaux d'activité très bas de certains radionucléides appartenant aux séries naturelles de l'uranium et du thorium.

L'évolution au cours du temps de l'activité massique des végétaux montre que les niveaux les plus élevés ont été mesurés pendant la période des essais atmosphériques. Les fluctuations observées pour cette période correspondaient aux apports par dépôts directs, secs ou humides, sur les plantes en fonction de l'intensité des retombées. Les 6 essais déjà évoqués ont conduit à des niveaux d'activité massique plus élevés dans les végétaux des atolls concernés. Pour cette période, les niveaux en ^{137}Cs du coprah des noix de coco collectées sur les différents archipels polynésiens permettent de cartographier la répartition spatiale de l'activité des végétaux. Celle-ci est globalement en accord avec les prévisions attendues à partir du choix des conditions météorologiques retenues pour réaliser les essais. L'atoll inhabité de Maria, situé sur l'axe de dispersion attendu du nuage à l'ouest des sites d'expérimentations, présentait les niveaux d'activité les plus élevés. Les îles de l'archipel des Marquises, situées au Nord du territoire polynésien, affichaient les niveaux les plus faibles, caractéristiques des retombées mondiales des essais atmosphériques réalisés par l'ensemble des pays détenteurs d'armes nucléaires. Au nord de cet axe, les îles des Tuamotu Sud-Est, de Tureia à Reao, ainsi que celles du groupe Actéon montraient les niveaux sensiblement plus élevés que ceux des autres atolls polynésiens. À partir de 1975, l'évolution pour l'ensemble des archipels s'est inscrite dans une tendance à la baisse qui était fonction des périodes radioactives des radionucléides. Ceux à vie courte ont disparu rapidement. Pour les radionucléides comme le ^{137}Cs, de période de 30 ans, le sol a joué le rôle d'un réservoir à partir duquel, par transferts racinaires, les végétaux étaient contaminés. Aujourd'hui, les niveaux de ces radionucléides dans les végétaux sont à l'état de traces pour l'ensemble des îles polynésiennes. Les différentes productions agricoles, en particulier le lait recueilli à Tahiti, ont fait l'objet d'une surveillance radiologique continue dès 1964. Les radionucléides à vie courte, comme les isotopes de l'iode, ont été mesurés pendant les campagnes d'essais atmosphériques, en particulier suite à l'essai Centaure. L'évolution au cours du temps des éléments comme le ^{137}Cs a suivi une décroissance de période effective de l'ordre de 13 ans jusqu'au début des années 90. Depuis, la persistance de ce radionucléide dans le sol des pâturages à des très faibles niveaux dans les sols et l'existence de Fc plus élevés pour les graminées fourragères dont se nourrissent les vaches explique une décroissance plus lente d'environ 30 ans proche de celle de la période radioactive.

En domaine marin, de l'arrêt des essais atmosphériques à nos jours, un gradient décroissant de l'activité volumique entre les eaux de mer sortant par les passes du lagon jusqu'à une dizaine de milles des atolls de Mururoa et Fangataufa a été mis en évidence pour les radionucléides caractérisés par des périodes moyennes et longues, notamment le $^{239+240}Pu$. En dehors de cette zone, la radioactivité ajoutée par les eaux des lagons des deux atolls n'était pas perceptible dans

les eaux océaniques polynésiennes. Dès lors, les activités volumiques des radionucléides d'origine artificielle présents dans les eaux océaniques de Polynésie ne se distinguaient pas des niveaux des eaux du Pacifique Sud qui se situaient parmi les plus basses de la planète.

Comme pour le plancton, les activités massiques les plus élevées concernant les grands poissons pélagiques ont été mesurées dans des poissons pêchés entre 1967 et 1968, à proximité des sites d'expérimentations. Par la suite, l'activité massique a rapidement diminué pour l'ensemble des espèces surveillées. Le ^{65}Zn ainsi que les autres radionucléides à vie courte ont disparu dès la fin des essais atmosphériques ; le ^{137}Cs s'est stabilisé à un niveau très bas, équivalent à celui mesuré dans les poissons pêchés dans les autres océans. Des différences entre les espèces ont été mises en évidence en rapport avec leur mode de vie : d'une part, une activité massique moyenne en $^{239+240}Pu$ plus faible pour les poissons vivant en profondeur que pour ceux vivant dans les eaux de surface ; d'autre part, une extension spatiale apparente plus importante des mêmes niveaux d'activités en plutonium chez les espèces migratrices par rapport aux espèces sédentaires. Les facteurs de concentration associés aux différents radionucléides mesurés sur les espèces polynésiennes et calculés à partir des résultats issus de la surveillance radiologique ont conduit à des valeurs inférieures aux valeurs génériques préconisées par l'AIEA pour le calcul du transfert de ces radionucléides aux organismes marins à partir de l'eau de mer.

V.8 - BIBLIOGRAPHIE

AALTONEN H. and *al.* (1987). - Studies on environmental radioactivity in Finland 1984/1985. STUK-A54, Annual report.

AARKROG A. and *al.* (1988). - Environmental Radioactivity in the North Atlantic Region including the Faroe Islands and Greenland. 1986. Riso National Laboratory, Roskilde (Denmark). Riso-R-550.

ANONYME - New Zealand MoFA (1984). Report of a New Zealand, Australian, and Papua New Guinea scientific mission to Mururoa Atoll. Tech.

BORISENKO G.S. and *al.* (1987). - Radiochemical Determination of Strontium-90 and caesium-137 in water of the Pacific Ocean and its neighboring seas. UDC 502.55(204) : 621.039.7.

BOUISSET P., BARKER E., MASSON O., GURRIARAN R., CAGNAT X., MEKHLOUCHE D., AUBRY S., HADJAD M. & SAEY L. (2004). - Concentration de ^{137}Cs et de ^{7}Be dans les aérosols en France métropolitaine et à Tahiti de 1959 à 2002. - Radioprotection, 39, (3), pp. 367-381.

BOURGÈS G. (1997). - Radiological Consequences of the Atmospheric tests on the islands of French Polynesia from 1966 to 1994. - In La Documentation française (Éd.), Paris 1998, "Geomechanical and radiological impact of nuclear tests at Mururoa and Fangataufa (French Polynésia)", Vol. 2, Doc. 13, pp. 925-957.

BOURLAT Y. *et al.* (1986). - Activité volumique de l'eau de mer en ^{137}Cs aux abords de Mururoa et dans l'océan Pacifique. Rapport interne SMSR, octobre 1996.

BOURLAT Y. MILLIES-LACROIX J-C., and RANCHER J. (1991). - $^{239+240}Pu$, ^{137}Cs, ^{90}Sr contents in seawater in the vicinity of Mururoa and Fangataufa atolls and in French Polynesia. International Symposium on Radionuclides in the Study of Marine Processes, Norwich (UK), september 9-14, 1991.

BOWEN V.T. *et al.*, (1980). - Fallout Radionucleides in the Pacific Ocean: Vertical and Horizontal Distribution, largely from Geosecs Stations. Earth and Planetary Science Letters, 49, p. 411-434.

CALMET D., PHILIPPOT J.C., MELQUIOND J.P., BARKER E. (2000). Le césium dans l'environnement: Atmosphère. *in* Le césium De l'environnement à l'Homme, EDP Sciences.

CAMBRAY R.S. et *al.* (1989). - Radioactive Fallout in Air and Rain. Results to the end of 1987. Harwell Laboratory. AERE R13226.

CAMBRAY R.S. et *al.*, (1989). - Radioactive Fallout in Air and Rain. Results to the end of 1988. Harwell Laboratory AERE R13575.

COMMISSARIAT À L'ENERGIE ATOMIQUE, DPS, (1963). - Etude de la contamination radioactive en Polynésie française, 1962-1963.

COMMISSARIAT À L'ENERGIE ATOMIQUE, /IPSN/DPHD, (1984). - Situation radiologique de la Polynésie Française en 1982. Evolution depuis 1975. Rapport IPSN.

CHAMBERLAIN A.C. (1991). - Radioactive aerosols. Cambridge Environmental Chemistry, series 3. Cambridge University press.

CIGNA A.A. and *al.* (1987). - Environmental Study of Fallout Plutonium in soils from the Piemonte Region (North-West Italy). J. Environ. Radioactivity, 5, p. 71-81.

CUNNINGHAM J.D., O'GRADY J. & RUSH T. (1988). - Radioactivity monitoring of the Irish marine environment 1985/1986. Nuclear Energy Board.

DOMANOV M.M., POYARKOV S.G. (1978). - Cesium 137 content of the surface water in the tropical Atlantic and Pacific Oceans (along the route of the 20th cruise of the R/V Dmitriy Mendeleyev). Oceanology 4370 p. 209-214.

DOURY A. (1987). - Evaluation comparative des retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl et des essais nucléaires atmosphériques. Radioprotection, vol. 22 n°2 p.137-160.

DUCOUSSO R. et *al.* (1982). - Etude de l'irradiation Naturelle Externe en Polynésie Française. Comparaison entre une île haute (Tahiti) et un atoll (Hao). Rapport CEA-R-5148.
Environmental Radioactivity Annual (1995). - Report 1994. National Radiation Laboratory. NRL-F/74.
FEELY H.W., LARSEN R. and SANDERSON C. (1985). - Annual Report of the Surface Air Sampling Program. E.M.L.-440.
FEELY H.W., LARSEN R. and SANDERSON C. (1988). - Annual Report of the Surface Air Sampling Program. E.M.L.-497.
GUARY J.C., GUEGUENIAT P., PENTREATH R.J., Editors, (1988). - Radionuclides : A tool for oceanography. Cherbourg Symposium (1-5 June 1987). Elsevier Applied Science.
GROUZELLE C., DOMINIQUE M., LAFAY F., DUCOUSSO R. (1985). - Résultats d'une enquête alimentaire effectuée à TAHITI de 1980 à 1982. Rapport CEA-R-5304.
HARLEY J. H. (1980). - Plutonium in the environment. A review. Journal of Radiation Research, 21, p. 83-104.
HIROSE K., AOYAMA M. (2003). - Analysis of ^{137}Cs and $^{239+240}Pu$ concentrations in surface waters of the Pacific Ocean. Deep-Sea Research II 50 2675–2700.
HOLM E., AARKROG A., BALLESTRA S. & DAHLGAARD H. (1986). - Origin and isotopic ratios of plutonium in the Barents and Greenland Seas. Earth and Planetary Science Letters, 79, p. 27-32.
HOLM E., ROOS P., PERSSON R.B.R., BOJANOWSKI R., AARKROG A., NIELSEN S.P. and LIVINGSTON H.D. (1991). - Radiocaesium and plutonium in Atlantic surface waters from 73° N to 72°S. International Symposium "Radionuclides in the study of marine processes", University of East Anglia, Norwich (UK), 10-13 sept. 1991. Edited by KERSHAW P.J. and WOODHEAD D.S., Elsevier Applied Science.
HUNT G.J. (1990). - Radioactivity in surface and coastal waters of the British Isles, 1989. Aquatic Environment Monitoring Report, N° 23, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food Directorate of Fisheries Research, Lowestoft, 66 pages.
HÖTZL H. and WINKLER R. (1987). - Activity concentrations of ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{210}Pb, ^{40}K and ^{7}Be and their temporal variations in surface air. Journal of Environmental Radioactivity, 5, p. 445-458.
JUZDAN Z.R. (1988). - Worldwide Deposition of ^{90}Sr through 1985. Environmental Measurements Laboratory. E.M.L.-515.
KABIS de SAINT-CHAMAS L., BABLET J.P., ARNOULD C., DUCOUSSO (1991). - Evolution de la teneur en césium137 depuis 1967 dans l'eau de coco et le coprah en Polynésie française. Radioprotection, GEDIM 1991, Vol 26 (1) 75-80.
KERSHAW P.J. and WOODHEAD D.S. (1991). - Radionuclides in the study of marine processes. International Symposium held at the University of East Anglia, Norwich (UK), Elsevier Applied Science.
LAMBERT G. et SANAK J. (1985). - La méthode du plomb 210. Datation de la neige antarctique. Méthodes de datation par les phénomènes nucléaires naturels. Applications. Masson p. 497-515.
LARSEN R.J. (1985). - Worldwide Deposition of 90Sr through 1983. Environmental Measurements Laboratory. E.M.L.-444.
LARSEN R.J. and SANDERSON C. (1991). - EML Surface Air Sampling Program, 1989 Data. E.M.L.-541.
MATTHEWS K.M. (1989). - Radioactive fallout in the South Pacific : a history. Part 1 Deposition in New Zealand. National Radiation Laboratory. Report NRL 1989/2.
MATTHEWS K.M. (1992). - Radioactive fallout in the South Pacific : a history. Part 2. Radioactivity measurements in the Pacific Islands. National Radiation Laboratory. Report NRL 1992/3.
MATTHEWS K.M. (1993). - Radioactive fallout in the South Pacific : a history. Part 3. Strontium-90 and caesium-137 deposition in New Zealand and resulting contamination of milk. National Radiation Laboratory. Report NRL 1993/4.
MATTHEWS K.M. (1994). - Fallout's trailing edge. Proceeding of the South Pacific Environmental Radioactivity Association, 3rd Spera Workshop Canberra (Australia), 15 - 17 February 1994. p. 19-23
MATTHEWS K.M. (1994). - Strontium-90 and caesium-137 deposition in New Zealand and resulting contamination of dairy products – a historical analysis. Proceeding of the South Pacific Environmental Radioactivity Association, 3rd Spera Workshop Canberra (Australia), p. 49-51.
MATTHEWS K.M. - Measurements of residual traces of ^{137}Cs in the atmosphere in New Zealand. National Radiation Laboratory. (sous presse).
MIKAYE Y. & SUGIMURA Y. (1976). - The plutonium content of Pacific Ocean waters. Proceedings of the symposium on transuranium nuclides in the environment. IAEA, Vienna, p. 91-105.
MILLIES-LACROIX J-C., BOURLAT Y. et MOSNIER R. (1995). - Airborne radioactivity measurements in Monthéry (France). Summary account of measurements made from 1986 through 1992. Second International Meeting on Low-level Air Radioactivity Monitoring, February 14-18, 1994, Madralin (near Warsaw), Poland. Central Laboratory for Radiological Protection, Polish National Atomic Agency.
NIES H. (1988). - Artificial radioactivity in the Northeast Atlantic. Radionuclides: A tool for oceanography. Elsevier. London. p. 250-259.
NIES H. (1990). - The contamination of the North Sea by artificial radionuclides during year 1987. J. Environ. Radioactivity,11, p. 55-70.
NIES H., ALBRECHT H. and HERRMANN J. (1991). - Radionuclides in water and suspended particulate matter from the North Sea. International Symposium "Radionuclides in the study of marine processes", University of East Anglia, Norwich (UK), 10-13 sept. 1991. Elsevier Applied Science.
OSTLUND H.G., GRALL C. and BRESCHER R.E. (1986). - Equatorial Pacific tritium. University of Miami, Tritium laboratory data report n°15.
POVINEC P., AARKROGB A., BUESSELERC K.O., DELFANTID R., HIROSE K., HONGF G.H., ITOA T., LIVINGSTONA H.D., NIESG H., NOSHKINH V.E. , SHIMAI S., TOGAWAA O. (2005). - ^{90}Sr, ^{137}Cs and $^{239+240}Pu$ concentration surface water time series in the Pacific and Indian Oceans e WOMARS results. Journal of Environmental Radioactivity 81 63-87.
RÉPUBLIQUE FRANCAISE, Retombées radioactives à la suite des tirs nucléaires en Polynésie française. 1966, 1967-1968, 1970, 1971. Rapports transmis à l'*Unscear*.
RÉPUBLIQUE FRANCAISE, Surveillance de la radioactivité, 1972 à nos jours. Rapports transmis à l'*Unscear*.
UNEP (1984). - Radioactivity in the South Pacific. Regional Seas Reports and Studies No. 40.
WEDEKIND C. (1982). - Tritium Distribution and Spreading in the North Sea and the Baltic Sea in 1980/81, as well as in the Surface Water of the North Atlantic in 1979. UDC 551.464.6.02.

CHAPITRE VI

Protection des travailleurs et des populations

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

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

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

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

VI.1 - DÉFINITION DES UNITÉS DE DOSES

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

Les différents types de rayonnements n'ont pas, à dose absorbée égale, le même effet sur la matière vivante : tissu ou organe. Pour en tenir compte, un facteur de pondération (W_R) est associé à chaque type de rayonnements pour établir la dose équivalente pour un organe ou un tissu donné. Le facteur W_R est égal à 1 pour les rayonnements gamma et X et, à 20 pour le rayonnement alpha. La dose équivalente est notée H_T et sa valeur est donnée par $H_T = D_{T,R} . W_R$. L'unité employée est le sievert (Sv). Les différents types de tissus et organes ne présentant pas le même niveau de radiosensibilité, un facteur de pondération tissulaire (W_T) est introduit. Sa valeur est de 0,2 pour les gonades, de 0,12 pour la moelle osseuse et de 0,05 pour la thyroïde. Son utilisation

permet de définir la dose efficace qui prend en compte l'ensemble des tissus et organes de l'organisme. Celle-ci est notée E et sa valeur est donnée par la formule : $E = \sum H_T . W_T$. L'unité employée est également le sievert. La dose efficace, destinée à exprimer un niveau de risque en termes généraux, est le plus souvent employée et couramment exprimée sous le terme de «dose».

Dans le cas particulier de l'incorporation de radionucléides dans l'organisme, l'exposition est conditionnée par la décroissance radioactive du radionucléide et par son temps de séjour dans l'organisme (période biologique cf. Annexe 1). Pour tenir compte de cet aspect temporel, un calcul «d'engagement» de la dose sur la durée de l'exposition est effectué. Cette période est très variable selon les radionucléides, de quelques heures à plusieurs dizaines d'années. Par exemple, l'iode-131 a une période radioactive de 8 jours et une période biologique de 80 jours alors que le plutonium-239 à une période radioactive de 24 000 ans et une période biologique de 20 ans dans le foie et de 50 ans dans l'os. Par convention, le calcul de l'engagement de dose (dose engagée) est fait, sauf cas particulier, sur 50 ans pour les adultes et sur 70 ans pour les enfants. Le calcul de dose engagée peut s'exprimer en termes soit de dose équivalente si l'on considère un organe «cible», soit de dose efficace si l'on prend en considération l'ensemble de l'organisme. Les doses sont calculées généralement en fonction de six classes d'âges : cinq classes pour les enfants et une pour les adultes.

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

VI. 2 - RÉGLEMENTATION RELATIVE À LA RADIOPROTECTION

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VI.2.1 - CONCENTRATIONS MAXIMALES ADMISSIBLES

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

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

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

VI.2.2 - CAS PARTICULIER DE LA THYROÏDE

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

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

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

VI.3 - ORGANISATION DE LA RADIOPROTECTION

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

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

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

navires autour des atolls, de superviser les contrôles radiologiques après l'essai et d'autoriser ensuite le retour des équipes sur les atolls (cf. Annexe 4).

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

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

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

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

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

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

VI.4.1 - PERSONNEL DU CEA

Le CEA disposait au CEP, comme dans tous ses centres, d'une structure dédiée à la médecine du travail très orientée, par vocation, vers la surveillance radiologique. Les Services de médecine du travail (SMT) étaient dirigés par des médecins, spécialistes chargés, à partir des

fiches de poste et de nuisance renseignées par l'employeur, de vérifier l'aptitude du personnel au poste de travail et, en particulier, celle à pouvoir travailler sous rayonnements ionisants. Les médecins assuraient la surveillance de l'exposition et, surtout, recherchaient une éventuelle exposition interne qui, si elle était avérée, était évaluée et traitée. Le SMT disposait de l'appui technique des Laboratoires d'analyses médicales (Lam), dirigés par des pharmaciens biologistes. Ces laboratoires étaient chargés des analyses sanguines, des analyses radiochimiques et des anthropogammamétries, dont le but est de déterminer le spectre des radionucléides présents dans un organisme humain pour détecter et quantifier une éventuelle exposition interne. Une coopération étroite existait avec le Lam du centre métropolitain CEA/DAM de Bruyères-le-Châtel, qui effectuait toutes les analyses du personnel, avant le départ vers les sites d'expérimentations et avec le Service de santé des Armées (SSA) qui effectuait les analyses sur sites. Un renfort de personnel du Lam a été mis en place à Mahina (Tahiti) pour la durée de chaque campagne d'essais atmosphériques et à Mururoa pendant les essais souterrains.

VI.4.2 - PERSONNEL DU MINISTÈRE DE LA DÉFENSE

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

VI.4.3 - PERSONNEL DES ENTREPRISES SOUS-TRAITANTES

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

VI.4.4 - ACCIDENTS DU TRAVAIL

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

- septembre 1965 : sur la base de Hao dans le cadre d'un chantier de travaux publics, une explosion a provoqué la mort de 3 employés de la société Dumez-Citra ;
- janvier 1970 : sur la base de Hao, l'explosion d'une citerne de carburant a entraîné le décès de 7 personnes dont 2 personnels militaires ;
- juin 1972 : le crash d'un Boeing KC135 au décollage de la base de Hao pour une mission d'observation à la suite de l'essai Titania a entraîné le décès de 6 personnes de la Défense ;
- juillet 1979 : au cours d'une opération d'assainissement de la cuve d'expérimentation Meknès sur l'atoll de Mururoa, une explosion a provoqué le décès de deux personnes du CEA ;
- en 1980 et 1985 : sur l'atoll de Mururoa, deux personnes du CEA sont décédées à la suite d'accidents mettant en cause des véhicules de transport et de levage.

VI.5 - SURVEILLANCE DU PERSONNEL

VI.5.1 - EXPOSITION EXTERNE

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

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

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

Un dosimètre thermoluminescent permet de déterminer la dose à partir de la mesure des interactions du rayonnement avec un matériau ayant des propriétés thermoluminescentes, comme le fluorure de calcium (CaF_2), le sulfate de calcium ($CaSO_4$) dopé au dysprosium ou le

fluorure de lithium (LiF). L'action d'un rayonnement sur un cristal thermoluminescent se fait essentiellement par des particules chargées existantes ou créées lors de l'interaction des atomes du cristal avec un rayonnement gamma, X ou neutron. L'énergie des particules chargées est transférée à des électrons qui sont libérés et piégés par les impuretés situées dans la bande de conduction du cristal. Une augmentation de la température du cristal provoque la libération des électrons et l'émission d'un photon lumineux, mais provoque la perte de la trace de l'interaction entre le rayonnement et le cristal. Cette émission de lumière est proportionnelle à l'intensité du rayonnement interagissant avec le cristal.

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

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

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



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



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

VI.5.1.1 - ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES

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

Personnel du CEA

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

Personnel du ministère de la Défense

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

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

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

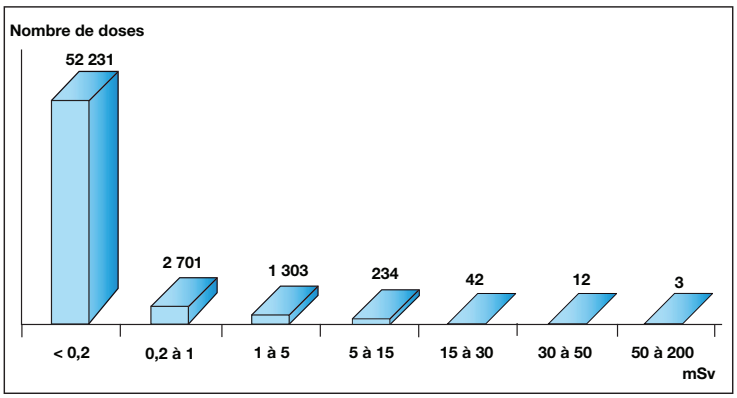


FIG. 181. - Histogramme du nombre de doses annuelles individuelles par année calendaire pendant la période des essais atmosphériques, hors personnel médical et irradiations médicales (1966-1974).

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

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

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

VI.5.1.2 - ESSAIS SOUTERRAINS

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

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

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

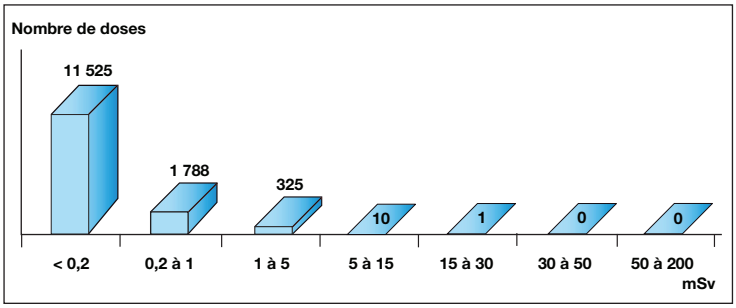


FIG. 182. - Histogramme du nombre de doses annuelles individuelles par année calendaire, pendant la période des essais souterrains, hors personnel médical et hors irradiation médicale (1975-1996).

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

VI.5.2 - EXPOSITION INTERNE

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

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

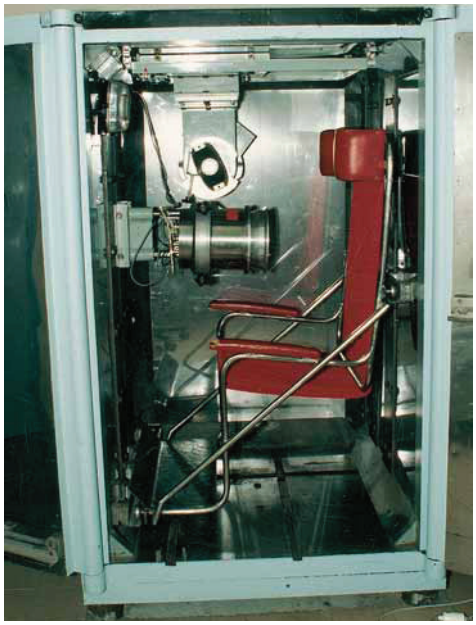
Les résultats de ces mesures et les connaissances acquises sur le métabolisme des radionucléides dans l'organisme humain permettent de déterminer les activités incorporées et d'évaluer les doses.

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

VI.5.2.1 - EXAMENS ANTHROPOGAMMAMÉTRIQUES

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

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



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

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

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

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

VI.5.2.2 - ANALYSES RADIOTOXICOLOGIQUES

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

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

VI.5.2.3 - ACTIVITÉS AYANT ENTRAÎNÉ DES EXPOSITIONS INTERNES

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

Travaux en présence de plutonium

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

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

Travaux en présence d'iode radioactif

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

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

Chantiers d'assainissement

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

- 0,01 à 0,1 mSv — 8 personnes
- 0,1 à 5 mSv — 34 personnes
- 5 à 10 mSv — 5 personnes
- 10 à 30 mSv — 3 personnes

VI.6 - RADIOPROTECTION HORS SITES D'EXPÉRIMENTATIONS

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

VI.6.1 - PRÉVISIONS MÉTÉOROLOGIQUES

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VI.6.3 - DÉFINITION DES ZONES D'EXCLUSION

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

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

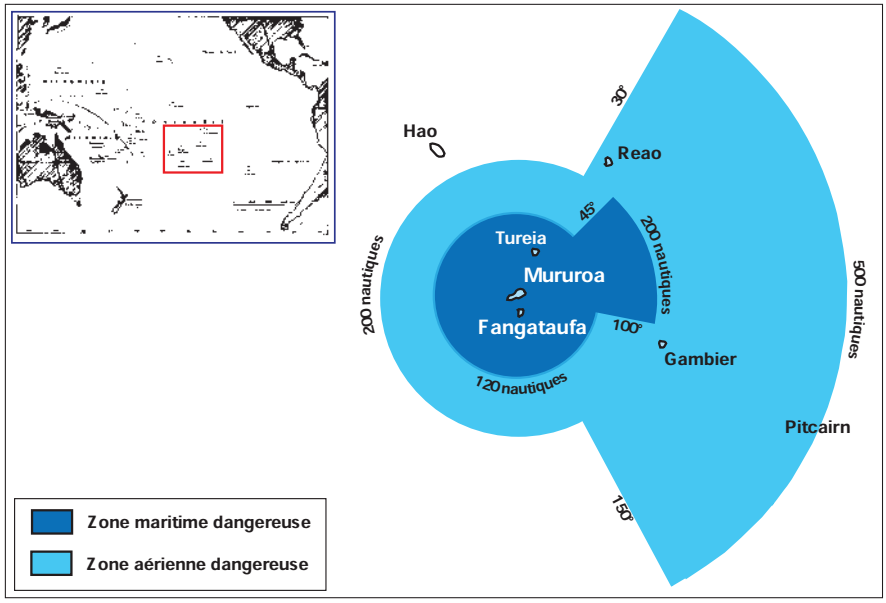


FIG. 183. - Les zones de restriction à la circulation nautique et aérienne définies pour la réalisation d'un essai atmosphérique au CEP.

Au moment de l'essai, pour assurer une protection contre les effets mécaniques, thermiques et les effets de l'exposition aux retombées du nuage radioactif, les bateaux étaient positionnés à une distance du point zéro dite «distance de sécurité». Cette distance de quelques dizaines de milles dépendait de l'énergie attendue lors de l'explosion de l'engin testé, du mode d'expérimentation et des conditions météorologiques. À cette distance et pour parer aux effets du flash lumineux, le personnel devait tourner le dos à l'explosion et mettre la tête dans les bras ou porter des lunettes anti-flash. Ce flash pouvait être perçu jusqu'à 100 milles nautiques à partir des bateaux et 200 milles nautiques à partir des avions.

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

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

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

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

VI.6.4.1 - GESTION D'UNE SITUATION IMPRÉVUE

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

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

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

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

- Dans l'hypothèse d'une dose efficace annuelle inférieure à 50 mSv, la population reviendrait à une vie normale et pourrait être amenée à mettre en œuvre des mesures simples de protection.
- Dans l'hypothèse d'une dose efficace annuelle comprise entre 50 et 150 mSv, la population serait rendue à ses activités, mais devrait respecter les consignes de sécurité des services de protection afin de limiter l'exposition aux rayonnements pendant le retour progressif à la vie normale.

- Dans l'hypothèse d'une dose efficace annuelle comprise entre 150 et 250 mSv, les risques d'une évacuation et d'une exposition aux rayonnements seraient comparés. Cette comparaison conduirait, soit à l'évacuation des populations, soit à une reprise des activités de la population, dans le respect des consignes de sécurité rigoureuse concernant en particulier l'alimentation.
- Enfin, au-delà de 250 mSv, l'évacuation des populations, du personnel militaire et des expérimentateurs civils aurait été automatiquement effectuée.

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

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

VI.6.4.2 - EXEMPLE DE L'ESSAI CENTAURE

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

Caractéristiques de l'essai

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

Prévisions des isochrones et débits de dose

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

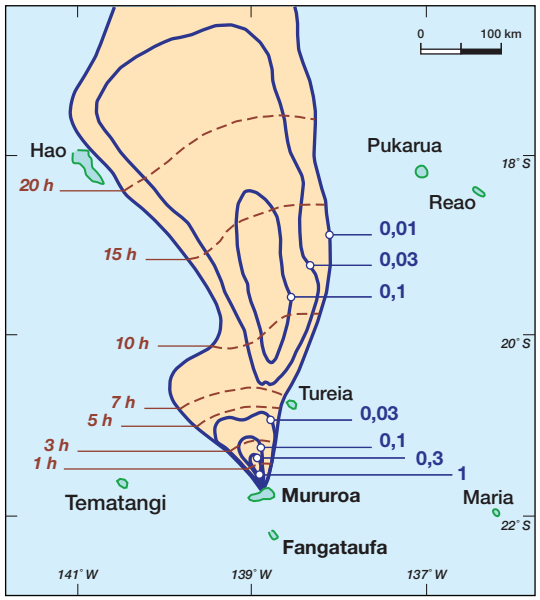


FIG. 184. - L'essai Centaure : prévisions des retombées réalisées 24 heures avant l'heure prévue de l'essai. *Les débits de dose ($mGy.h^{-1}$) ne sont pas corrigés de la décroissance radioactive.*

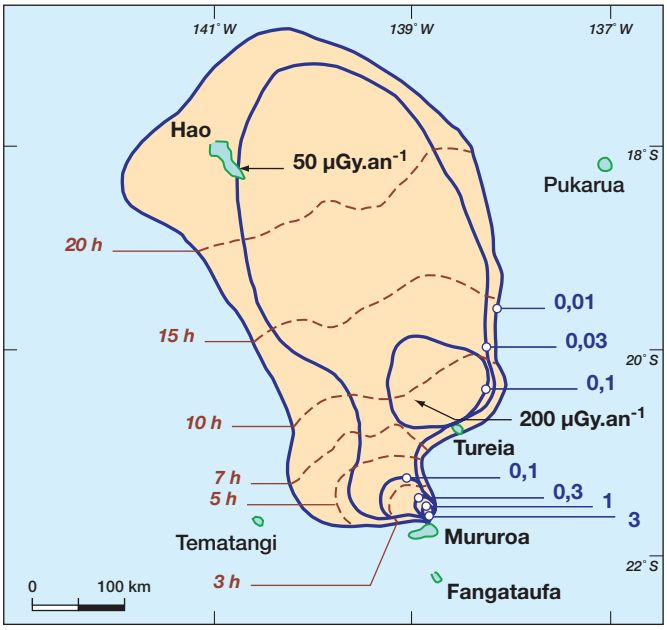


FIG. 185. - L'essai Centaure : prévisions des retombées réalisées 12 heures avant l'heure prévue de l'essai.
Les débits de dose ($mGy.h^{-1}$) ne sont pas corrigés de la décroissance radioactive.

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

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

Trajectoires réelles du nuage

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

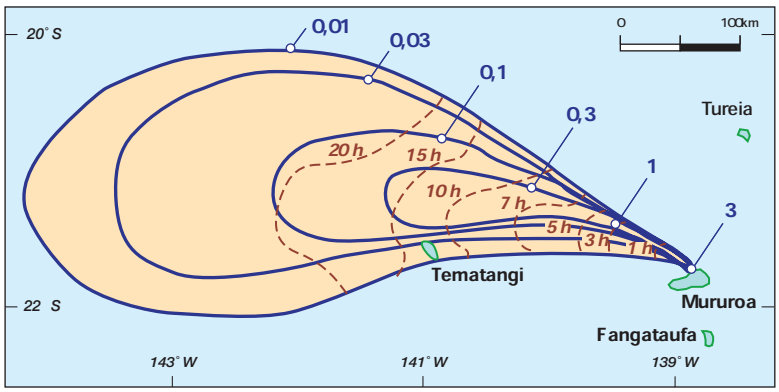


FIG. 186. - L'essai Centaure : estimation des retombées réalisées après l'essai.
Les débits de dose ($mGy.h^{-1}$) ne sont pas corrigés de la décroissance radioactive.

VI.6.5 - SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DES POPULATIONS

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

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

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

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

VI.6.5.1 - MÉTHODOLOGIE DES CALCULS DE DOSE

Les doses reçues par les populations résultent des expositions dues :

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

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

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

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

Activité atmosphérique et dépôt au sol

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

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

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

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

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

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

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

C'est sur la base de ces critères que les vitesses de dépôt sont déterminées. Elles sont généralement comprises dans un intervalle de 5.10^{-3} à 3.10^{-1} $m.s^{-1}$. Dans le cas, où un intervalle de valeurs est pris en compte, les résultats des calculs de dose sont également exprimés sous la forme d'un intervalle dont la borne inférieure correspond à la vitesse de dépôt la plus forte et la borne supérieure à la vitesse de dépôt la plus faible.

Doses dues à l'inhalation d'aérosols radioactifs

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

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

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

où,

$\mathbf{A_i}$ est l'activité volumique intégrée du radionucléide **i** ($Bq.m^{-3}.s$) ;
$\mathbf{R_j}$ est le débit respiratoire d'un individu de classe d'âge **j** ($m^3.s^{-1}$) ;
$\mathbf{DPUI_{ij}}$ est la dose par unité d'incorporation pour le radionucléide **i** et un individu de classe d'âge **j** ($Sv.Bq^{-1}$) ;
$\mathbf{F_p}$ est un paramètre compris entre 0 et 1 qui permet de prendre en compte la protection apportée par un équipement particulier, une habitation, un temps de présence inférieur à celui du passage du nuage.

Le passage du nuage radioactif se traduit par une activité volumique de l'air exprimée en $Bq.m^{-3}$ qui dépend du temps. L'activité volumique intégrée $\mathbf{A_i}$ est le résultat de l'intégration de l'activité volumique sur la durée **T** du passage du nuage.

$$\mathbf{A_i} = \int_0^T \mathbf{a_i(t).dt}$$

où,

$\mathbf{a_i(t)}$ est l'activité volumique du radionucléide **i** ($Bq.m^{-3}$) ;
T est la durée du passage du nuage (s).

L'aérosol est représenté par un ensemble de particules de densité égale à 1 supposées sphériques et dont les diamètres sont répartis suivant une loi dite «log-normale» dont la médiane est le «diamètre aérodynamique médian». Ce diamètre est un paramètre qui conditionne, d'une part, la valeur de la vitesse de dépôt et, d'autre part, la valeur de la DPUI. En effet, les particules de plus grand diamètre sont piégées par le système respiratoire supérieur (nez et pharynx), puis dégluties alors que les particules de plus petite taille pénètrent dans le système respiratoire profond (bronches et alvéoles pulmonaires) et peuvent alors passer la barrière pulmonaire et diffuser dans l'ensemble de l'organisme. La DPUI est donc d'autant plus élevée que la taille de la particule est petite.

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

Doses dues à l'exposition externe

Doses dues à l'immersion dans le nuage

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

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

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

où :

A_i est l'activité volumique intégrée du radionucléide **i** ($Bq.m^{-3}.s$) ;
$CD_i^{ext,\,p}$ est le coefficient de dose efficace en Sv pour une immersion dans une activité volumique intégrée unitaire du radionucléide **i** ($Sv.Bq^{-1}.s^{-1}.m^3$) ;
F_p est un paramètre compris entre 0 et 1 qui permet de prendre en compte la protection apportée par un équipement particulier, une habitation, un temps de présence inférieur à celui du passage du nuage.

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

Doses dues à l'exposition au dépôt

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

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

où :

D_i est le dépôt du radionucléide **i** ($Bq.m^{-2}$) ;
$CD_i^{ext,\,d}$ est le coefficient de dose efficace ($Sv.h^{-1}.Bq^{-1}.m^2$).

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

$$D^{ext,\,d} = F_p \cdot \sum_i \dot{D}_i^{ext,\,d} \frac{\left[1-\exp(-\lambda_i \cdot T)\right]}{\lambda_i}$$

où :

λ_i est la constante de décroissance radioactive du radionucléide **i** (s^{-1}) ;
$\dot{D}_i^{ext,\,d}$ est le débit de dose dû au radionucléide **i** ($Sv.s^{-1}$) ;
F_p est un paramètre compris entre 0 et 1 qui permet de prendre en compte la protection apportée par un équipement particulier, une habitation, un temps de présence inférieur à celui du passage du nuage ;
T est la durée d'intégration du débit de dose (s).

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

Doses dues à l'ingestion de produits alimentaires

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

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

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

où:

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

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

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

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

Coefficients de doses utilisés

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

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

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

IV.6.5.2 - RATIONS ALIMENTAIRES

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

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

TABLEAU 55.
Rations alimentaires ($g.jour^{-1}$) établies pour Tureia.

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

TABLEAU 56.
Rations alimentaires (g.jour^{-1}) établies pour Tahiti.

Catégorie alimentaire	Aliments	Population urbaine		Population rurale	
		Adultes	Enfants de 1 à 2 ans	Adultes	Enfants de 1 à 2 ans
Boissons	**Eau**	**2 700**	**1 000**	**1 000**	**500**
	Eau de coco			**2 000**	
	Lait	**300**	**500**	**300**	**500**
Poissons	Thon	13			
	Bonite	106			
	Ature	18			
	Inaa	5			
	Haute mer			30	
	Lagon			440	
	Total	**231**	**100**	**380**	**100**
Viandes	Poulet	1		10	
	Porc	49		10	
	Boeuf	28			
	Chien			10	
	Total	**78**	**20**	**30**	**10**
Mollusques	Turbo	15	5	60	
	Bénitier	15	5	100	
	Autres			30	
	Total	**30**	**10**	**190**	**30**
Crustacés	**Langouste**			**20**	
Coprah		**6**		**220**	
Fruits (arbres)	Banane	40		50	
	Papaye	12		60	
	Citron	19			
	Mangue	32			
	Avocat	6			
	Pamplemousse	5			
	Arbre à pain	28		60	
	Autres	52			
	Total	**194**		**170**	
Fruits (herbacées)	Ananas	28			
	Tomate	28			
	Concombre	17			
	Aubergine	3			
	Autres	164			
	Total	**240**			
Légumes feuilles	Salade	20			
	Chou	18			
	Poireau	3			
	Fafa	2			
	Autres	20			
	Total	**63**	**30**	**63**	**30**
Racines et tubercules	*Taro*	48			
	Patate douce	26			
	Tarua	13			
	Navet	12			
	Carotte	10			
	Autres	6			
	Total	**115**			

TABLEAU 57.
Rations alimentaires (g.jour^{-1}) établies pour les îles Gambier.

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

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

VI.6.6 - ÉVALUATIONS RADIOLOGIQUES

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

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

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

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

VI.6.6.1 - RETOMBÉES SUR L'ATOLL DE TUREIA

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



ESSAI RIGEL

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

Atmosphère

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

Dépôts au sol

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

Eau de boisson

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



Prélèvement d'eau de coco à Tureia.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DE TUREIA

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

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

Doses (mSv)	Enfants de 1 à 2 ans		Adultes	
	Dose efficace	Dose thyroïde	Dose efficace	Dose thyroïde
Inhalation (1)	**0,0026**	**0,03**	**0,002**	**0,015**
Exposition externe au panache (1)	**$1,4.10^{-4}$**		**$1,4.10^{-4}$**	
Exposition externe au dépôt (2)	**0,051**		**0,051**	
Consommation d'eau (3)	**0,05 - 0,08**	**0,52 - 0,88**	**0,01 - 0,02**	**0,12 - 0,2**
Consommation de produits marins (4)	**0,0046 - 0,095**	**0,056 - 1,1**	**0,0018 - 0,074**	**0,019 - 0,73**
Bilan	***0,1 - 0,2***	***0,6 - 2,0***	***0,06 - 0,1***	***0,2 - 0,9***

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

(2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations.

(3) L'indice bêta global de l'eau de boisson étant sous la forme d'un intervalle de valeurs, les doses dues à la consommation d'eau de boisson sont sous la forme d'un intervalle de valeurs dont la valeur maximale correspond à l'indice bêta global maximum de cette eau.

(4) Les doses dues à la consommation de produits marins sont déduites des rapports établis, à partir des observations de terrain, entre les mesures de l'indice bêta global des dépôts au sol et les doses dues à la consommation de produits de la pêche. Ces rapports varient de $2,2.10^{-6}$ à $1,1.10^{-7}$ et correspondent respectivement à la dose maximale et minimale

emar ue La dose due à la consommation de légumes-fruits et de fruits est négligeable et il n'y a pas de production de légumes-feuilles à Tureia.

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires réalisées après l'essai ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 0,06 et 0,15 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 0,10 et 0,23 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 0,2 et 0,9 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 0,6 et 2,0 mSv.

ESSAI ARCTURUS

L'essai Arcturus d'une énergie de 22 kt a été effectué à Mururoa, le 2 juillet 1967, à 7h30, heure locale, sur une barge ancrée dans le lagon. Pendant l'essai, un vent au niveau du sol venait du nord-nord-est, alors que de 5 000 à 9 000 mètres d'altitude, sa direction était de ouest-sud-ouest avec une vitesse de 15 $m.s^{-1}$. La vitesse maximale du vent mesurée à 31 $m.s^{-1}$ était observée à 13 000 mètres. Ces conditions météorologiques ont entraîné le nuage radioactif vers l'île de Tureia, à 110 km au nord de Mururoa. Le 4 juillet, entre 16h10 et 19h10, Tureia est atteint par les retombées. Ce même jour, 2,5 mm de pluie sont tombés sur l'atoll. Ces retombées ont été confirmées par les mesures effectuées dans les différentes composantes de l'environnement et de la chaîne alimentaire.

Atmosphère

Un indice bêta global maximum de 9,25 $Bq.m^{-3}$ a été enregistré à Tureia, accompagné d'un débit de dose 50 $\mu Gy.h^{-1}$.

Dépôt au sol

Le 4 juillet, le débit de dose dû aux dépôts a été mesuré entre 3 à 10 $\mu Gy.h^{-1}$ ce qui correspondait, à des activités surfaciques calculées comprises entre 1,30 et $4,45.10^{6}$ $Bq.m^{-2}$. Cette dernière valeur correspondait à un dépôt de $1,60.10^{7}$ $Bq.m^{-2}$ le 2 juillet 1967 à la fin des retombées. L'indice bêta global mesuré entre $3,3.10^{5}$ et 35.10^{5} $Bq.m^{-2}$ sur des bacs collecteurs des retombées conforte ces estimations. L'indice bêta global de l'eau de pluie collectée le 4 juillet s'élevait à $4,8.10^{4}$ $Bq.l^{-1}$.

Eau de boisson

L'indice bêta global de l'eau de la citerne permettant l'adduction d'eau était de 11 à 74 $Bq.l^{-1}$ le 4 juillet, avant l'arrivée de la pluie, et de 2 400 $Bq.l^{-1}$ le 5 juillet.

Végétaux

L'indice bêta global mesuré sur des échantillons de fruits d'arbre à pain (*uru*) et de papayer était respectivement de $4,72.10^{3}$ et $4,42.10^{3}$ $Bq.kg^{-1}$ frais, le 5 juillet.



Prélèvement de végétaux-feuilles à Tureia.

Mollusques et crustacés

La valeur maximale de l'indice bêta global de $6,93.10^{5}$ $Bq.kg^{-1}$ frais a été mesurée le 5 juillet dans la chair d'un bénitier prélevé le 3 juillet. L'indice bêta global de la chair d'un turbo prélevée le 11 juillet était de $2,02.10^{3}$ $Bq.kg^{-1}$ frais.

Poissons

L'indice bêta global le plus élevé, $1,66.10^{4}$ $Bq.kg^{-1}$ frais, a été mesuré dans la chair d'un poisson chirurgien prélevé le 11 juillet. L'indice bêta global de la chair d'un poisson perroquet prélevé le 6 juillet était de $3,08.10^{3}$ $Bq.kg^{-1}$ frais, à la date du 11 juillet ; celui d'un mérou prélevé le 3 juillet était de $1,3.10^{3}$ $Bq.kg^{-1}$ frais, au 5 juillet.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DE TUREIA

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 59).

TABLEAU 59.
Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Arcturus à Tureia.

Doses (mSv)	Enfants de 1 à 2 ans		Adultes	
	Dose efficace	Dose thyroïde	Dose efficace	Dose thyroïde
Inhalation (1)	**0,019 - 0,11**	**0,23 - 1,38**	**0,012 - 0,07**	**0,1 - 0,63**
Exposition externe au panache (1)	**$1,7.10^{-3}$ - $9,9.10^{-3}$**		**$1,7.10^{-3}$ - $9,9.10^{-3}$**	
Exposition externe au dépôt (2)	**0,7**		**0,7**	
Consommation d'eau (3)	**0,11**	**1,24**	**0,03**	**0,29**
Consommation de végétaux (4)	**0,018 - 0,019**	**0,2 - 0,22**	**0,013 - 0,014**	**0,13 - 0,14**
Consommation de produits marins (5)	**0,049 - 3,05**	**0,56 - 34,6**	**0,033 - 2,38**	**0,34 - 23,5**
Bilan	***0,9 - 4,0***	***2,2 - 37,4***	***0,8 - 3,2***	***0,9 - 24,6***

(1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache sont estimées à partir de l'indice bêta global du dépôt ($1,6.10^{7}$ Bq.m^{-2}) et de deux vitesses de dépôt, 5.10^{-2} et 3.10^{-1} ms^{-1}. Cet intervalle de valeurs prend en compte les incertitudes sur la granulométrie de l'aérosol atmosphérique composant le nuage radioactif. Les indices bêta global des aérosols atmosphériques sont estimés, selon la vitesse de dépôt, entre 3.10^{4} et 5.10^{3} Bq.m^{-3}, en moyenne, pendant le passage du nuage. La dose maximale correspond à la vitesse de 5.10^{-2} m.s^{-1} et la dose minimale à 3.10^{-1} m.s^{-1}. Les doses sont calculées avec l'hypothèse que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache et ne disposaient d'aucune protection particulière.

(2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations.

(3) Les doses dues à la consommation d'eau de boisson correspondent à la valeur maximale mesurée. L'activité de l'eau est supposée décroître selon la décroissance radioactive des radionucléides qu'elle contient et dont le spectre est identique à celui de l'aérosol atmosphérique et du dépôt. Les doses sont calculées pour une consommation d'eau d'un mois à partir de l'arrivée du front de retombées. Au-delà, l'activité de l'eau est considérée comme négligeable.

(4) La dose est due à la consommation de légumes-fruits et de fruits produits localement. Il n'y a pas de production de légumes-feuilles à Tureia.

(5) La borne supérieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure de l'activité sont plus élevés (poissons chirurgiens et bénitiers) car pêchés dans le lagon. La borne inférieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure sont plus faibles (mérous et turbos) car pêchés en haute mer.

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires disponibles ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 0,8 et 3,2 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 0,9 et 4,0 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 0,9 et 24,6 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 2,2 et 37,4 mSv. La dose de 37,40 mSv délivrée à la thyroïde des enfants est limitée à une population enfantine ayant consommé des mollusques, notamment des bénitiers.

ESSAI ENCELADE

L'essai Encelade d'une puissance de 440 kt a été effectué le 12 juin 1971 à 10h15, heure locale, sous ballon sur le site de Mururoa, par 450 mètres d'altitude. Le jour de l'essai, les vents venaient du sud-sud-est, avec une vitesse de 5 $m.s^{-1}$. En altitude, le régime des vents était mal établi, les vents venaient du sud-ouest, avec une vitesse assez faible, de 10 $m.s^{-1}$, à 9 000 mètres. Après l'essai, des conditions météorologiques défavorables entraînèrent le nuage radioactif vers l'île de Tureia. Les retombées arrivèrent 8 heures et 50 minutes après l'essai. Le maximum de la retombée a été observé entre 12 heures et 35 minutes et 15 heures et 10 minutes après l'essai. Ces retombées, accompagnées d'une pluie de 10 mm dont la durée a été de 7 heures, ont été confirmées par les mesures effectuées dans l'air, sur le sol et dans les eaux de boisson.

Atmosphère

La valeur maximale de l'indice bêta global, 66 $Bq.m^{-3}$, a été enregistrée à Tureia, dans l'après midi du 13 juin. Le débit de dose variait entre 30 et 60 $\mu Gy.h^{-1}$.

Dépôt au sol

La valeur maximale de l'indice bêta global du dépôt a atteint $2,2.10^{7}$ $Bq.m^{-2}$.

Eau de boisson

Les résultats les plus élevés de l'indice bêta global de l'eau de boisson ont été enregistrés pour des échantillons d'eau prélevés dans deux citernes le 13 juin, avec $7,40.10^{4}$ et $7,03.10^{4}$ $Bq.l^{-1}$.



Élevage de porcs chez un particulier.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DE TUREIA

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 60).

TABLEAU 60.
Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Encelade à Tureia.

Doses (mSv)	Enfants de 1 à 2 ans		Adultes	
	Dose efficace	Dose thyroïde	Dose efficace	Dose thyroïde
Inhalation (1)	**0,01 - 0,062**	**0,14 - 0,82**	**0,004 - 0,024**	**0,04 - 0,25**
Exposition externe au panache (1)	**$1,3.10^{-3}$ - 8.10^{-3}**		**$1,3.10^{-3}$ - 8.10^{-3}**	
Exposition externe au dépôt (2)	**1,12**		**1,12**	
Consommation d'eau (3)	**0,25 - 1,8**	**3,023 - 21,12**	**0,06 - 0,45**	**0,66 - 4,7**
Consommation de végétaux (4)	**0,008**	**0,04**	**0,0036**	**0,016**
Consommation de viande	**0,0014 - 0,0068**	**0,007 - 0,056**	**0,0006 - 0,0028**	**0,0025 - 0,02**
Consommation de produits marins (5)	**0,083 - 0,48**	**0,67 - 4,5**	**0,06 - 0,3**	**0,46 - 2,54**
Bilan	***1,5 - 3,5***	***3,9 - 26,5***	***1,2 - 1,9***	***1,2 - 7,5***

(1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache sont estimées à partir de l'indice bêta global du dépôt ($2,2.10^{7}$ Bq.m^{-2}) et de deux vitesses de dépôt, 5.10^{-2} et 3.10^{-1} m.s^{-1}. Les indices bêta global des aérosols atmosphériques sont estimés, selon la vitesse de dépôt, entre 5.10^{4} et 8.10^{3} Bq.m^{-3}, en moyenne, durant les 2 heures et 30 minutes du passage du nuage. Cet intervalle de valeurs prend en compte les incertitudes sur la granulométrie de l'aérosol atmosphérique composant le nuage radioactif. La dose maximale correspond à la vitesse de 5.10^{-2} m.s^{-1} et la dose minimale à 3.10^{-1} m.s^{-1}. Les doses sont calculées avec l'hypothèse que les populations étaient à l'intérieur des habitations pendant les retombées maximum qui sont arrivées pendant la nuit.

(2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations.

(3) Les doses dues à la consommation d'eau de boisson sont sous la forme d'un intervalle de valeurs dont chaque borne correspond à la consommation d'eau de l'une des citernes. L'activité de l'eau est supposée diminuer selon la décroissance radioactive des radionucléides qu'elle contient et dont le spectre est identique à celui de l'aérosol atmosphérique et du dépôt. Les doses sont calculées pour une consommation d'eau d'un mois à partir de l'arrivée du front de retombées. Au-delà, l'activité de l'eau est considérée comme négligeable.

(4) Il n'y a pas de production de légumes-feuilles à Tureia et aucun résultat de mesure ayant porté sur des végétaux, fruits ou viandes n'indique d'activité susceptible d'entraîner des doses supérieures à quelques dizaines de microsieverts.

(5) La borne supérieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure de l'activité sont plus élevés (poissons perroquets et bénitiers) car pêchés dans le lagon. La borne inférieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure sont plus faibles (poissons et bénitiers pêchés sur le récif).

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires disponibles ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 1,3 et 1,9 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 1,5 et 3,5 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 1 et 8 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 4 et 27 mSv. La dose maximale de 27 mSv délivrée à la thyroïde des enfants est limitée à une population enfantine ayant bu de l'eau de citerne de collecte des eaux de pluie.

VI.6.6.2 - RETOMBÉES SUR LES ÎLES GAMBIER

Les retombées sur les Îles de l'archipel des Gambier sont consécutives aux essais Aldébaran du 2 juillet 1966, Rigel du 24 septembre 1966 et Phoebé du 8 août 1971.

ESSAI ALDÉBARAN

L'essai Aldébaran, d'une puissance de 28 kt, a été réalisé le 2 juillet 1966, à 5h30, heure locale, sur une barge ancrée dans le lagon de Mururoa. Il a été effectué par un vent d'ouest-nord-ouest dont la vitesse était de l'ordre de 5 $m.s^{-1}$ au sol et de 20 $m.s^{-1}$ en altitude. Des conditions météorologiques défavorables ont provoqué une inclinaison et un cisaillement du panache, avant sa dispersion dans l'atmosphère. Les vents ont poussé les aérosols et les gaz radioactifs vers l'île inhabitée de Morane, puis vers les Îles Gambier situées à 450 km de Mururoa. Les retombées sont arrivées sur l'archipel des Gambier, le jour de l'essai de 16h20 à 17h40. Ces retombées ont été confirmées par les résultats des mesures effectuées dans les différentes composantes de l'environnement et de la chaîne alimentaire.

Atmosphère

L'air a fait l'objet d'une mesure d'indice bêta global, de l'ordre de 60 $Bq.m^{-3}$. Le débit de dose maximum enregistré pendant le passage du panache a atteint 250 $\mu Gy.h^{-1}$.



Dépôt au sol

Le dépôt maximum à Rikitea, sur l'île de Mangareva, était de $5,9.10^{7}$ $Bq.m^{-2}$.

Eau de boisson

Quatre mesures de l'indice bêta global des eaux de boisson ont été effectuées : le 6 juillet (3 $Bq.l^{-1}$), le 8 juillet (814 $Bq.l^{-1}$), le 9 juillet (592 $Bq.l^{-1}$) et le 21 juillet (2 $Bq.l^{-1}$).

Végétaux

Les valeurs maximales de l'indice bêta global maximum de 8.10^{5} $Bq.kg^{-1}$ frais ont été mesurées, le 7 juillet, dans des feuilles de radis et $6,7.10^{5}$ $Bq.kg^{-1}$ frais le 6 juillet dans une salade.

Mollusques et crustacés

Plusieurs mesures d'indice bêta global ont été effectuées sur des mollusques et crustacés prélevés entre le 4 et le 19 juillet 1966. La valeur la plus élevée a été obtenue lors de la mesure de la chair d'un bénitier ($2,2.10^{5}$ $Bq.kg^{-1}$), les autres résultats étant beaucoup plus faibles : oursin (1 258 $Bq.kg^{-1}$, le 4 juillet), turbo (370 $Bq.kg^{-1}$, le 4 juillet), crabe (555 $Bq.kg^{-1}$, le 19 juillet).

Poissons

Des mesures de l'indice bêta global sur les poissons ont été effectuées entre les 5 et 13 juillet. Le résultat le plus élevé, 130 $Bq.kg^{-1}$ frais, a été obtenu sur une bonite pêchée dans le lagon.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DES ÎLES GAMBIER

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 61).

TABLEAU 61.
Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Aldébaran sur les îles Gambier.

Doses (mSv)	Enfants de 1 à 2 ans		Adultes	
	Dose efficace	Dose thyroïde	Dose efficace	Dose thyroïde
Inhalation (1)	**0,2 - 2,2**	**3 - 30**	**0,12 - 1,2**	**1,3 - 13**
Exposition externe au panache (1)	**0,02 - 0,21**		**0,02 - 0,21**	
Exposition externe au dépôt (2)	**2,9**		**2,9**	
Consommation d'eau	**0 - 0,48**	**0 - 6**	**0 - 0,12**	**0 - 1,3**
Consommation de végétaux (3)	**0,1 - 1,7**	**1,3 - 19**	**0,09 - 1,4**	**1 - 14**
Consommation de produits marins (3)	**$1,9.10^{-3}$ - 1,88**	**0,022 - 22,8**	**$9,5.10^{-4}$ - 0,8**	**$9,8.10^{-3}$ - 8,6**
Bilan	***3,2 - 9,4***	***4,3 - 77,8***	***3,1 - 6,6***	***2,3 - 36,9***

(1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache sont estimées à partir de l'indice bêta global du dépôt ($5,9.10^{7}$ Bq.m^{-2}) et de deux vitesses de dépôt, 10^{-2} et 10^{-1} m.s^{-1}. Les indices bêta global des aérosols atmosphériques sont estimés, selon la vitesse de dépôt, entre $1,2.10^{5}$ et $1,2.10^{4}$ Bq.m^{-3}, en moyenne, durant les 80 minutes de passage du nuage. Cet intervalle de valeurs prend en compte les incertitudes sur la granulométrie de l'aérosol atmosphérique composant le nuage radioactif. La dose maximale correspond à la vitesse de dépôt de 10^{-2} m.s^{-1} et la dose minimale à la vitesse de dépôt de 10^{-1} m.s^{-1}. Les doses sont calculées avec l'hypothèse que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache et ne disposaient d'aucune protection particulière.

(2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations.

(3) La borne supérieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des végétaux dont les résultats de mesure de l'activité sont plus élevés. La borne inférieure correspond à la consommation des végétaux dont les résultats de mesure sont les plus faibles.

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires disponibles ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 3,1 et 6,6 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 3,2 et 9,4 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 2 et 40 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 4 et 80 mSv. La dose de 80 mSv délivrée à la thyroïde des enfants correspond à la dose maximale en supposant que l'enfant aurait consommé la totalité de sa ration alimentaire en sélectionnant systématiquement les éléments les plus contaminés.

ESSAI RIGEL

L'essai Rigel, d'une puissance de 125 kt, a eu lieu le 24 septembre 1966 à 7h00, heure locale, sur une barge ancrée dans le lagon de Fangataufa. Au moment de l'essai, les sondages météorologiques indiquaient des vents de sud-est, avec une vitesse de 5 $m.s^{-1}$ entre le sol et 500 mètres d'altitude, des vents variables et faibles entre 600 et 3 000 mètres d'altitude. De 3 000 mètres jusqu'à la stratosphère, les vents venaient de l'ouest, avec une vitesse moyenne de 40 $m.s^{-1}$, atteignant une vitesse de 50 $m.s^{-1}$ vers 12 000 mètres d'altitude.

Le front des retombées est arrivé sur les Îles Gambier entre 11 et 14 heures après l'essai. Des précipitations d'une durée de 5 minutes se sont produites 19 heures après l'essai, ainsi que le 26 septembre durant 1 heure (1,3 mm de hauteur de précipitation).



Prélèvement de végétaux-feuilles sur le Mont Duff aux îles Gambier.

Atmosphère

Un indice bêta global moyen de l'air, sur 24 heures, de 3,7 $Bq.m^{-3}$ a été mesuré au PCR de Mangareva. L'eau de pluie mesurée à ce même poste indiquait un indice bêta global de $1,1.10^{5}$ $Bq.l^{-1}$.

Dépôt au sol

Le dépôt a été estimé à partir de l'activité de l'air, associée à une vitesse de dépôt de 10^{-1} $m.s^{-1}$ et du dépôt humide calculé à partir de l'activité de l'eau de pluie et des quantités tombées. Ainsi, le 26 septembre, après les pluies, l'indice bêta global du dépôt était de l'ordre de $1,75.10^{5}$ $Bq.m^{-2}$, à Mangareva.

Eau de boisson

L'activité de l'eau de boisson a été établie à partir de l'activité de l'eau de pluie. L'expérience acquise autour d'autres essais a permis d'établir la valeur du rapport entre l'indice bêta global de l'eau de pluie et l'indice bêta global de l'eau de boisson entre 12 et 20. L'indice bêta global de l'eau de boisson le 26 septembre peut donc être estimé entre $9,2.10^{3}$ et $5,5.10^{3}$ $Bq.l^{-1}$.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DES ÎLES GAMBIER

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 62).

TABLEAU 62.
Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Rigel sur les îles Gambier.

Doses (mSv)	Enfants de 1 à 2 ans		Adultes	
	Dose efficace	Dose thyroïde	Dose efficace	Dose thyroïde
Inhalation (1)	**$9{,}4.10^{-4}$**	**0,011**	**$7{,}1.10^{-4}$**	**0,0052**
Exposition externe au panache (1)	**$4{,}7.10^{-5}$**		**$4{,}7.10^{-5}$**	
Exposition externe au dépôt (2)	**0,019**		**0,019**	
Consommation d'eau (3)	**0,38 - 0,64**	**4,4 - 7,3**	**0,1 - 0,17**	**1 - 1,7**
Consommation de végétaux (4)	**0,013**	**0,13**	**0,012**	**0,1**
Consommation de produits marins (5)	**0,0016 - 0,033**	**0,02 - 0,38**	**0,00064 - 0,026**	**0,0067 - 0,26**
Bilan	***0,4 - 0,7***	***4,6 - 7,8***	***0,1 - 0,2***	***1,1 - 2,1***

(1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache sont calculées avec l'hypothèse que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache et ne disposaient d'aucune protection particulière. Ces doses sont estimées à partir de l'indice bêta global du dépôt ($1{,}75.10^{5}$ Bq.m^{-2}) et d'une vitesse de dépôt de 10^{-1} m.s^{-1}. Les indices bêta global des aérosols atmosphériques sont estimés à 160 Bq.m^{-3}, en moyenne, pendant la durée de passage du nuage sur les Îles Gambier.

(2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations.

(3) L'activité de l'eau de boisson étant sous la forme d'un intervalle de valeurs, les doses dues à la consommation d'eau de boisson sont sous la forme d'un intervalle de valeurs dont la valeur maximum correspond à l'activité maximum de cette eau.

(4) L'indice bêta global des légumes-feuilles est établi à partir du dépôt, sur la base d'un rendement de 1 kg.m^{-2} et d'un rapport de captation de 0,1 qui amène l'indice bêta global des légumes-feuilles à $1{,}75.10^{4}$ Bq.kg^{-1}.

(5) Les doses dues à la consommation de produits marins sont déduites des rapports établis, à partir des observations de terrain, entre les mesures de l'indice bêta global des dépôts au sol et les doses dues à la consommation de produits de la pêche. Ces rapports varient de $2{,}2.10^{-6}$ à $1{,}1.10^{-7}$ et correspondent respectivement aux doses maximale et minimale.

Les calculs ont permis d'estimer :
- la dose efficace aux adultes entre 0,1 et 0,23 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 0,4 et 0,7 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 1,1 et 2,1 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 4,6 et 7,8 mSv.

Les doses maximales (efficaces et à la thyroïde) pour les adultes et les enfants sont principalement dues à la consommation d'eau de boisson.

ESSAI PHOEBÉ

L'essai Phoebé, d'une puissance de 4 kt, a été réalisé sous ballon par 230 mètres d'altitude sur la site de Mururoa, le 8 août 1971 à 9h30, heure locale. Au moment de l'essai, la nébulosité était importante et les vents modérés, avec une visibilité supérieure à 15 km. Au sol, les vents venaient du sud-est avec une vitesse de l'ordre de 5 $m.s^{-1}$. Au-delà de 1 500 mètres d'altitude, les vents venaient de l'ouest et leur vitesse variait de 20 à 25 $m.s^{-1}$. Après l'essai, des conditions météorologiques défavorables ont entraîné le nuage radioactif vers les Îles Gambier situées à 450 km de Mururoa. Les populations de Rikitea et Taku sont restées dans les abris de prévoyance pendant 17 heures, de 4h30 à 21h30 après l'essai. Les retombées arrivèrent sur les Îles Gambier 6h10 après l'essai, accompagnées d'une pluie qui a duré 30 minutes.



Atmosphère

Une retombée a été constatée aux Îles Gambier, entre 6h10 et 6h40 après l'essai. Le débit de dose maximal a été mesuré à 50 $\mu Gy.h^{-1}$ pendant une brève période. L'indice bêta global de l'air a atteint un maximum de 6 $Bq.m^{-3}$ à Totegegie, 6h30 après l'essai, avec un débit de dose associé de 14 $\mu Gy.h^{-1}$.

Dépôt au sol

Un indice bêta global de $5,18\ 10^{6}$ $Bq.m^{-2}$ a été mesuré sur un dépôt prélevé à Totegegie, 6 heures et 30 minutes après l'essai.

Eau de boisson

L'activité de l'eau distribuée par le système d'adduction à Rikitea, principal village des Îles Gambier, ainsi que celle de l'eau distribuée à partir de la citerne de Taku, petit village de quelques dizaines d'habitants, ont fait l'objet de contrôles réguliers (Tableaux 63 et 64).

TABLEAU 63.
Activité volumique en ^{131}I ($Bq.l^{-1}$) de l'eau de boisson prélevée à Taku.

Date de prélèvement	Points de prélèvements							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10/08/1971	-	-	-	-	-	-	-	2 300
15/08/1971	454	736	1 190	248	7	287	693	1 252
17/08/1971	115	185	405	123	28	279	83	11
24/08/1971	< LD	120	80	4	38	10	260	< LD
31/08/1971	< LD	67	< LD	3	14	86	132	2

TABLEAU 64.
Activité volumique en ^{131}I ($Bq.l^{-1}$) de l'eau de boisson prélevée à Rikitea.

Date de prélèvement	Points de prélèvements	
	Source	Robinet
10/08/1971	**1,37**	**0,8**
17/08/1971	**2**	**90**
24/08/1971	**12**	**15**

Végétaux

Les légumes-feuilles ont fait l'objet de contrôles réguliers. L'indice bêta global le plus élevé, $4,5.10^{5}$ $Bq.kg^{-1}$, a été mesuré le 12 août dans des prélèvements de salade non lavés.

Mollusques

Un indice bêta global de 950 $Bq.kg^{-1}$, dont 183 $Bq.kg^{-1}$ de ^{131}I, a été mesuré le 25 août dans un bénitier prélevé le 11 août. Ceci correspond à un indice bêta global égal à $1,73.10^{4}$ $Bq.kg^{-1}$, dont 615 $Bq.kg^{-1}$ en ^{131}I à la date du prélèvement. Une activité de 55,8 $Bq.kg^{-1}$ de ^{131}I a été mesurée le 25 août dans un turbo prélevé le 11 août, ce qui correspond à une activité de 188 $Bq.kg^{-1}$ en ^{131}I à la date du prélèvement.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION DES ÎLES GAMBIER

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 65).

TABLEAU 65.
Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Phoebé sur les îles Gambier.

Doses (mSv)	Enfants de 1 à 2 ans		Adultes	
	Dose efficace	Dose thyroïde	Dose efficace	Dose thyroïde
Inhalation (1)	**0,00076 - 0,0031**	**0,0096 - 0,039**	**0,00053 - 0,0021**	**0,0042 - 0,017**
Exposition externe au panache (1)	**0,00052 - 0,002**		**0,00052 - 0,002**	
Exposition externe au dépôt (2)	**0,11**		**0,11**	
Consommation d'eau (3)	**0,37 - 7**	**4,3 - 88,2**	**0,1 - 1,8**	**1 - 19,4**
Consommation de végétaux (4)	**0,028 - 0,72**	**0,34 - 9**	**0,025 - 0,64**	**0,27 - 7,1**
Consommation de produits marins (5)	**0,015 - 0,048**	**0,18 - 0,58**	**0,0058 - 0,019**	**0,06 - 0,2**
Bilan	***0,5 - 7,9***	***4,8 - 97,8***	***0,2 - 2,6***	***1,3 - 26,7***

(1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe due au panache sont calculées pour une activité des aérosols atmosphériques estimée à partir des dépôts ($5,18.10^{6}$ $Bq.m^{-2}$). Pour tenir compte des incertitudes sur la granulométrie des aérosols atmosphériques, un intervalle de vitesse de dépôts compris entre 5.10^{-2} $m.s^{-1}$ et 2.10^{-1} $m.s^{-1}$ a été retenu.
L'indice bêta global des aérosols atmosphériques est estimé, selon la vitesse de dépôt, entre $5,7.10^{4}$ et $1,5.10^{4}$ $Bq.m^{-3}$, en moyenne, pendant les trente minutes du passage du nuage sur les Îles Gambier.

Les doses sont calculées dans une fourchette correspondant à l'intervalle des vitesses de dépôt. Les doses dues à l'inhalation sont calculées avec un facteur de protection égal à 0,1 car les populations étaient à l'intérieur des abris de prévoyance pendant le passage du nuage. Les doses dues à l'exposition externe résultant du passage du nuage sont calculées avec un facteur de protection égal à 0,5.

(2) Les doses dues à l'exposition externe par le dépôt sont calculées pour une durée d'intégration de six mois, en supposant que les personnes passaient les deux tiers du temps à l'extérieur des habitations. Les populations ayant séjourné durant les 24 premières heures dans les abris de prévoyance, la dose durant cette période a été considérée comme nulle.

(3) La valeur maximale correspond à la dose reçue par un habitant de Taku et la valeur minimale à celle reçue par un habitant de Rikitea.

(4) La borne supérieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des végétaux dont les résultats de mesure de l'activité sont plus élevés. La borne inférieure correspond à la consommation des végétaux dont les résultats de mesure sont les plus faibles.

(5) La borne supérieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure de l'activité sont plus élevés (bénitier) car présentant des facteurs de reconcentration plus élevés (mollusques filtreurs) la borne inférieure de l'intervalle est la dose due à la consommation des produits de la mer dont les résultats de mesure de l'activité sont moins élevés (turbo) car présentant des facteurs de reconcentration plus faibles (mollusques brouteurs).

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires disponibles ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 0,2 et 2,6 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 0,5 et 7,9 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 1,3 et 26,7 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 4,8 et 98 mSv. La dose de 98 mSv délivrée à la thyroïde des enfants correspond à une population enfantine ayant consommé des denrées produites localement parmi les plus contaminées. La principale contribution aux doses efficaces et à la thyroïde est la consommation d'eau. Les doses maximales sont obtenues à Taku (île de Mangareva) et correspondent à la consommation des eaux du puits communal.

Autres essais ayant contribué plus faiblement aux retombées sur les Îles Gambier :

Eridan (1970)

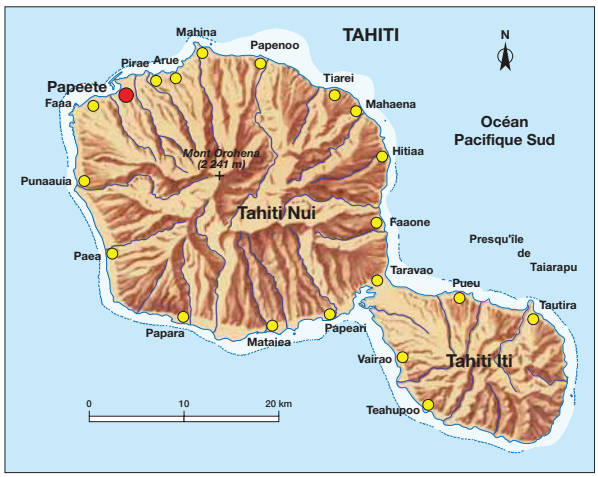
Une retombée directe est détectée aux îles Gambier le 25 juin à 01h00. Le débit de dose maximal de 0,95 $\mu Gy.h^{-1}$ était atteint le 25 juin à 12h30. L'activité volumique moyenne de l'air le 25 juin était de 5,5 $Bq.m^{-3}$.

Toucan (1970)

Des retombées directes ont été détectées aux îles Gambier, le 7 août, à 14h00. Le maximum a été atteint le 8 août, entre 1h00 et 3h00, avec 0,84 $\mu Gy.h^{-1}$. L'activité volumique atmosphérique moyenne sur 24 heures était de 0,55 $Bq.m^{-3}$ avec, pendant une heure, un pic à 3,5 $Bq.m^{-3}$.

VI.6.6.3 - RETOMBÉES SUR L'ÎLE DE TAHITI

ESSAI CENTAURE



L'essai Centaure, d'une puissance de 4 kt, a été réalisé sous ballon, par 270 mètres d'altitude, sur le site de Mururoa, le 17 juillet 1974 à 8h00, heure locale. Il a été effectué sur la limite Nord d'une cellule anticyclonique en voie d'affaiblissement centrée sur l'atoll de Mobrane ; avec des vents de basse couche venant du sud-est, d'une vitesse de l'ordre de 5 $m.s^{-1}$ tendant à faiblir dans la journée du 17 juillet. Dix minutes après l'essai, la tête du nuage s'est détachée du pied et a culminé à 5 200 mètres, une altitude plus basse que les estimations prévues. Le nuage principal a généré plusieurs nuages secondaires qui ont suivi des trajectoires distinctes, dirigées vers l'ouest. Ces conditions météorologiques ont entraîné le nuage radioactif vers l'île de Tahiti. Les retombées ont abordé Tahiti le 19 juillet par la côte Est.

Des précipitations (1,4 mm) liées aux effets du relief ont bloqué les nuages au-dessus de Tahiti, entraînant des dépôts au sol hétérogènes. D'Arue à Papara, sur la côte Ouest qui est la plus peuplée, le niveau de la retombée a été dix fois plus faible que sur la côte Est et la presqu'île, où il a été sensiblement plus élevé. Compte tenu des temps de transport des aérosols jusqu'à Tahiti, les radionucléides prépondérants étaient les ^{239}Np, ^{105}Rh, ^{133}I, ^{132}I et ^{131}I, représentant respectivement 12,2%, 7,6%, 7%, 5,2% et 2% de l'activité.

Atmosphère

À Tahiti, le 19 juillet, l'indice alpha global de l'atmosphère était de 0,044 $Bq.m^{-3}$, dont 70% de ^{239}Pu, et l'indice bêta global était de 740 $Bq.m^{-3}$, dont 1% dû aux iodes radioactifs ; les activités volumiques étant de l'ordre du $Bq.m^{-3}$ pour les ^{89}Sr et ^{90}Sr.

À Mahina, les indices bêta global moyens sur 24 heures, mesurés sur deux filtres positionnés le 19 juillet, étaient de 629 et 1 180 $Bq.m^{-3}$. Les filtres ont également fait l'objet d'une spectrométrie gamma directe (Tableau 66).

TABLEAU 66.
Activités volumiques ($Bq.m^{-3}$) des radionucléides émetteurs gamma présents sur les deux filtres prélevés à Mahina le 19 juillet 1974.

Radionucléides	Filtre 1 (629 $Bq.m^{-3}$)	Filtre 2 (1 180 $Bq.m^{-3}$)
^{95}Zr	3	8
^{95}Nb	0,1	0,35
^{97}Zr	23	54
^{97}Nb	25	58
^{99}Mo	36	130
^{99m}Te	39	142
^{103}Ru	4	11
^{131}I	12	37
^{132}Te	21	60
^{132}I	22	62
^{133}I	15	43
^{136}Cs	0,4	1,62
^{137}Cs	-	0,05
^{140}Ba	10	37
^{140}La	7	24
^{141}Ce	-	11
^{143}Ce	24	91
^{239}Np	83	278
$^{239+240}Pu$	-	0,07

Dépôt au sol

Les mesures effectuées ont montré une grande hétérogénéité des dépôts sur les zones côtières (Fig. 159). Compte tenu de cette hétérogénéité, différentes estimations de dose ont été effectuées, considérant toutes les populations concernées de Tahiti.

Ces estimations de dose ont été faites pour :

- Hitiaa, où l'activité du dépôt a été trois fois plus élevée ($7,5.10^6$ Bq.m^{-2}) que celle mesurée à Mahina ($2,5.10^6$ Bq.m^{-2}) ;
- Pirae, où l'activité du dépôt était égale à $3,3.10^5$ Bq.m^{-2} ;
- le sud de Teahupoo et le plateau de Taravao, où les activités des dépôts ont été maximales, $2,75.10^7$ Bq.m^{-2}, du fait des précipitations plus importantes dans ces deux régions.

Eaux de boisson

L'indice bêta global et l'activité des radionucléides émetteurs gamma présents dans l'eau de boisson ont été suivis au cours du temps, à Hitiaa, (Tableau 67) ainsi qu'à Pirae et Teahupoo pour l'indice bêta global (Tableau 68). La valeur la plus élevée de l'indice bêta global, 7 000 Bq.l^{-1}, a été atteinte le 19 juillet, à Hitiaa.

TABLEAU 67.
Activités volumiques (Bq.l^{-1}) des radionucléides mesurés par spectrométrie gamma dans l'eau de boisson prélevée à Hitiaa, du 19 juillet au 1er août 1974.

Date	Activité β global	^{131}I	^{132}I	^{133}I	^{140}Ba-La	^{103}Ru	^{95}Zr
19/07	7 061	88	600	230	44	34	7
20/07	2 717	48	47	26	17		
21/07	602	12	27	19	4		
22/07	403						
23/07	281	5	21	7	1		
24/07	1 320	35	109	45	139		
25/07	512	6	15	6			
26/07	140	4	3	4			
27/07	48	4		5			
28/07	150						
29/07	30	1					
30/07	100	1					
31/07	8						
01/08	44						

TABLEAU 68.
Activités volumiques (Bq.l^{-1}) des radionucléides mesurés par spectrométrie gamma dans l'eau de boisson prélevée à Pirae et à Teahupoo, du 19 juillet au 1er août 1974.

Date	Activité β global Pirae	Activité β global Teahupoo
19/07	733	941
20/07	463	144
21/07	302	261
22/07	142	275
23/07	104	140
24/07	221	47
25/07	223	51
26/07	221	88
27/07	60	93
28/07	47	48
29/07	34	4
30/07	23	11
31/07	24	47
01/08	40	8

Lait de vache

En 1973, le lait produit à Tahiti représentait 20% de la consommation totale. Il provenait du plateau de Taravao, pour 800 000 litres, et des régions de Mataiea et Atimaono, pour 300 000 litres. Ce lait servait à la production de produits dérivés (yaourts, glaces, fromages) et de lait pasteurisé. Une partie de ce lait n'était donc pas habituellement consommé immédiatement après sa production.



Vaches dans les paturages de Tahiti.

D'autres élevages, comportant au total 92 vaches laitières, ont produit un lait dont la consommation locale a été immédiate. L'activité volumique du lait, en particulier celle de ^{131}I, produit par l'un de ces élevages, à Hitiaa, a été suivie journalièrement entre le 19 juillet et le 16 septembre 1974 (Fig. 187). Ces données complètent celles obtenues pour le lait commercialisé au marché de Papeete (Fig. 168).

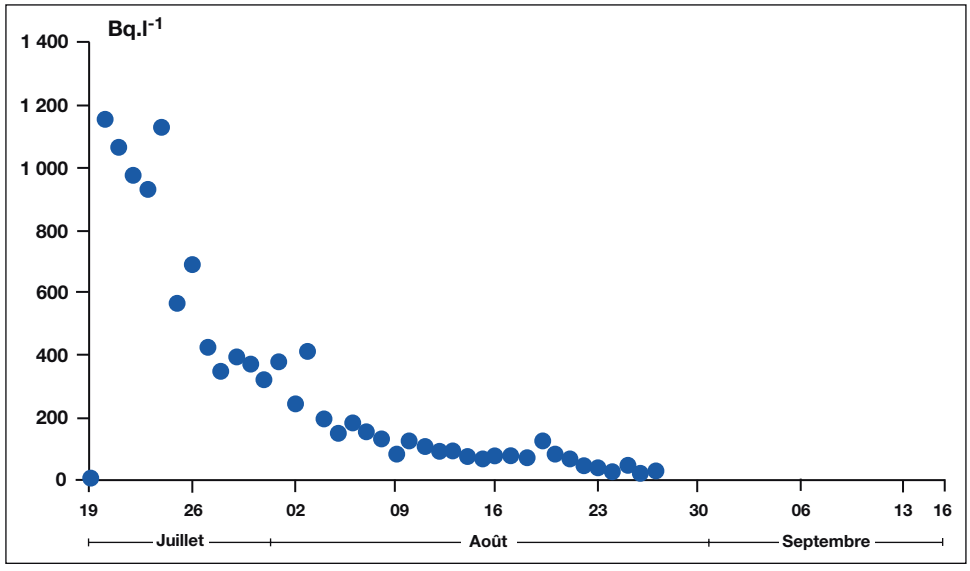


FIG. 187. - Activité volumique (Bq.l^{-1}) de ^{131}I dans le lait produit à Hitiaa, entre le 19 juillet et le 16 septembre 1974.

Légumes

Les mesures réalisées sur les végétaux ont porté sur de nombreuses variétés de la production locale : salades, choux chinois, *fafa* (variété d'épinard), poireaux, etc. Les valeurs maximales de l'indice bêta global ont été mesurées, le 19 juillet 1974, dans le *fafa* : 410 000 Bq.kg^{-1} frais, dont 8 000 Bq.kg^{-1} frais pour ^{131}I, 13 000 Bq.kg^{-1} frais pour ^{132}I, 11 000 Bq.kg^{-1} frais pour ^{133}I et 10 000 Bq.kg^{-1} frais pour ^{140}La. À Teahupoo, le 19 juillet, l'activité dans le *fafa* était de 2 070 Bq.kg^{-1} frais, pour ^{140}La, et 4 290 Bq.kg^{-1} frais, pour ^{131}I. L'activité mesurée dans les salades était beaucoup plus faible, inférieure à 100 Bq.kg^{-1} frais.

Viandes et produits animaux

Compte tenu des transferts et des courtes périodes radioactives des radionucléides prépondérants, les niveaux d'activité des viandes étaient faibles. L'indice bêta global des œufs de poules prélevés à Mahina était de 6 500 Bq.kg^{-1} frais, le 26 juillet. À Hitiaa, l'indice bêta global des œufs prélevés était mesuré à 4 660 Bq.kg^{-1} frais, le 26 juillet.

Produits de la mer

Les niveaux d'activité des produits de mer ont été faibles, compte tenu des transferts et des courtes périodes radioactives des principaux radionucléides. Par exemple, l'activité due à l'iode-131 a atteint 13 Bq.kg^{-1} dans un rouget et 8 Bq.kg^{-1} dans la chair d'un bénitier. L'activité maximum due à l'iode-131 a été de 32 Bq.kg^{-1} dans un *ature*, le 14 août 1974.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION DES POPULATIONS DE TAHITI

L'hétérogénéité des dépôts au sol et le contraste entre les habitudes alimentaires des populations urbaines et celles des populations rurales de l'île nécessitent de faire des estimations de dose différentes, tenant compte de ces facteurs. Trois estimations de dose ont été faites :

- La première pour Pirae dont les sols ont été épargnés par les pluies pendant les retombées et dont les habitants ont des habitudes de vie urbaines.
- La deuxième pour Hitiaa où des pluies ont accru les retombées et dont les habitants ont des habitudes de vie rurales.
- Enfin, la troisième estimation de dose concerne deux zones de l'île de Tahiti ayant des caractéristiques communes : le plateau de Taravao et la région de Teahupoo. En effet, toutes deux ont fait l'objet de dépôts pluvieux et abritent des activités d'élevage, avec une présence réduite de travailleurs agricoles.

Ces trois zones ont des profils démographiques très différents. La zone de Pirae, comme celle de Papeete regroupe la plus grande part des habitants de l'île, alors que la zone d'Hitiaa regroupe quelques milliers d'habitants. Les zones de Taravao et Teahupoo sont fréquentées par quelques centaines de personnes.

Estimation de l'exposition de la population de Pirae

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 69).

TABLEAU 69.
Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Centaure sur Tahiti à Pirae.

Doses (mSv)	Enfants de 1 à 2 ans		Adultes	
	Dose efficace	Dose thyroïde	Dose efficace	Dose thyroïde
Inhalation (1)	**0,05**	**0,57**	**0,046**	**0,27**
Exposition externe au panache (1)	**0,002**		**0,002**	
Exposition externe au dépôt (2)	**0,053**		**0,053**	
Consommation de lait (3)	**0,36**	**4,5**	**0,03**	**0,4**
Consommation d'eau (4)	**0,05**	**0,6**	**0,016**	**0,2**
Consommation d'œuf et de viande	**0,095**	**1,28**	**0,046**	**0,57**
Consommation de végétaux (5)	**0,35**	**4,3**	**0,15**	**1,7**
Consommation de produits marins (6)	**0,23**	**2,86**	**0,11**	**1,22**
Bilan	***1,2***	***14,1***	***0,5***	***4,4***

(1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache ont été calculées sur la base d'une activité des aérosols atmosphériques estimée à partir du dépôt ($3,3.10^5$ Bq.m^{-2}) et pour une vitesse de dépôt de 5.10^{-3} m.s^{-1}, correspondant à une situation de temps sec. L'indice bêta global des aérosols atmosphériques est estimé à 1 500 Bq.m^{-3}, en moyenne, durant le passage du nuage sur Tahiti, soit douze heures et trente minutes. Cette dose est estimée en supposant que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache.

(2) Les doses dues à l'exposition externe au dépôt sont estimées pour une présence de six mois, en supposant que les populations étaient à l'extérieur des habitations les deux tiers du temps. L'indice bêta global retenu pour le dépôt est $3,3.10^5$ Bq.m^{-2}.

(3) La consommation de lait a été estimée à un demi-litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et à 30 cl par jour, pour les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 26 août, date à partir de laquelle l'activité du lait a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.

(4) La consommation quotidienne d'eau a été supposée de 1 litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 2,7 litres, pour les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 1er août, date à partir de laquelle l'activité de l'eau a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.

(5) La dose a été calculée pour une consommation quotidienne de 30 grammes de végétaux, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 100 grammes, pour les adultes, pendant une période de 6 mois.

(6) Les doses ont été calculées pour une consommation quotidienne de 100 grammes de poisson et 15 grammes de mollusques et crustacés, pour les enfants de 1 à 2 ans et de 370 grammes de poisson et 50 grammes de mollusques et crustacés, pour les adultes, pendant une période de 6 mois.

Estimation des doses pour les populations de Hitiaa

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 70).

TABLEAU 70.
Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Centaure sur Tahiti à Hitiaa.

Doses (mSv)	Enfants de 1 à 2 ans		Adultes	
	Dose efficace	Dose thyroïde	Dose efficace	Dose thyroïde
Inhalation (1)	**0,57**	**6,4**	**0,52**	**3,1**
Exposition externe au panache (1)	**0,025**		**0,025**	
Exposition externe au dépôt (2)	**1,2**		**1,2**	
Consommation de lait (3)	**2,1**	**25**	**0,2**	**1,7**
Consommation d'eau (4)	**0,1**	**1,3**	**0,03**	**0,3**
Consommation d'œuf et de viande	**0,051**	**0,68**	**0,0246**	**0,25**
Consommation de végétaux (5)	**0,95**	**11,9**	**0,41**	**4,5**
Consommations de produits marins (6)	**0,274**	**3,4**	**0,177**	**1,96**
Bilan	***5,3***	***48,7***	***2,6***	***11,8***

(1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache ont été calculées à partir d'une activité des aérosols atmosphériques estimée à partir du dépôt ($7,5.10^6$ Bq.m^{-2}) et pour une vitesse de dépôt de 10^{-2} m.s^{-1}, correspondant à une situation de temps pluvieux. L'indice bêta global des aérosols atmosphériques est estimé à 16 500 Bq.m^{-3}, en moyenne, durant le passage du nuage sur Tahiti, soit douze heures et trente minutes. Cette dose est estimée en supposant que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache.

(2) Les doses dues à l'exposition externe au dépôt sont estimées pour une présence de six mois, en supposant que les populations étaient à l'extérieur des habitations les deux tiers du temps. L'indice bêta global retenu pour le dépôt est $7,5.10^6$ Bq.m^{-2}.

(3) La consommation de lait a été estimée à un demi-litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et à 30 cl par jour, pour les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 26 août, date à partir de laquelle l'activité du lait a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.

(4) La consommation quotidienne d'eau a été supposée d'un demi-litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 1 litre pour, les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 1er août, date à partir de laquelle l'activité du lait a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.

(5) La dose a été calculée pour une consommation quotidienne de 30 grammes de végétaux, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 100 grammes, pour les adultes, pendant une période de 6 mois.

(6) Les doses ont été calculées pour une consommation quotidienne de 100 grammes de poisson et 35 grammes de mollusques et crustacés, pour les enfants de 1 à 2 ans. Les doses ont été calculées pour une consommation quotidienne de 470 grammes de poisson et 210 grammes de mollusques et crustacés, pour les adultes, pendant une période de 6 mois.

Estimation de l'exposition des populations de Teahupoo et Taravao

Les doses ont été estimées à partir des résultats de mesure de la radioactivité et pour les différentes voies d'atteinte : inhalation, exposition externe, consommation de produits locaux (Tableau 71).

TABLEAU 71.
Évaluation des doses (mSv) suite aux retombées de l'essai Centaure sur Tahiti à Teahupoo et Taravao.

Doses (mSv)	Enfants de 1 à 2 ans		Adultes	
	Dose efficace	Dose thyroïde	Dose efficace	Dose thyroïde
Inhalation (1)	**2,1**	**24,2**	**1,9**	**11**
Exposition externe au panache (1)	**0,09**		**0,09**	
Exposition externe au dépôt (2)	**1,1**		**1,1**	
Consommation de lait (3)	**0,36**	**4,5**	**0,03**	**0,4**
Consommation d'eau (4)	**0,018**	**0,22**	**0,0045**	**0,05**
Consommation d'œuf et de viande	**0,0461**	**0,61**	**0,025**	**0,23**
Consommation de végétaux (5)	**0,56**	**6,9**	**0,225**	**2,6**
Consommation de produits marins (6)	**0,274**	**3,4**	**0,177**	**1,96**
Bilan	***4,5***	***39,8***	***3,6***	***16,2***

(1) Les doses dues à l'inhalation et à l'exposition externe au panache ont été calculées à partir d'une activité des aérosols atmosphériques estimée à partir du dépôt ($2,7.10^7$ Bq.m^{-2}) et pour une vitesse de dépôt de 10^{-2} m.s^{-1}, correspondant à une situation de temps pluvieux. L'indice bêta global des aérosols atmosphériques est estimé à 60 000 Bq.m^{-3}, en moyenne, durant le passage du nuage sur Tahiti, soit douze heures et trente minutes. Cette dose est estimée en supposant que les populations étaient à l'extérieur des habitations pendant le passage du panache.

(2) Les doses dues à l'exposition externe au dépôt sont estimées pour une présence de six mois, en supposant que les personnes ayant des activités dans ces zones y étaient présentes durant 4 heures par jour. L'indice bêta global retenu pour le dépôt est de $2,75.10^7$ Bq.m^{-2}.

(3) La consommation de lait a été estimée à un demi-litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et à 30 cl par jour, pour les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 26 août, date à partir de laquelle l'activité du lait a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.

(4) La consommation quotidienne d'eau a été supposée d'un demi litre par jour, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 1 litre, pour les adultes, sur la période allant du 19 juillet au 1er août, date à partir de laquelle l'activité du lait a suffisamment décru pour ne plus être prise en compte.

(5) La dose a été calculée pour une consommation quotidienne de 30 grammes de végétaux, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 100 grammes, pour les adultes, pendant une période de 6 mois.

(6) Les doses ont été calculées pour une consommation quotidienne de 100 grammes de poisson et 35 grammes de mollusques et crustacés, pour les enfants de 1 à 2 ans, et de 470 grammes de poisson et 210 grammes de mollusques et crustacés, pour les adultes, pour une période de six mois.

La dose efficace maximale délivrée à un enfant de 1 à 2 ans, tranche d'âge présentant les doses les plus élevées, vivant à Hitiaa, a été de l'ordre de 5 mSv, en 1974. La contribution de la dose due à la consommation de lait représente 60% de la dose efficace par ingestion et 40% de la dose efficace totale.

La dose efficace maximale pour un enfant de 1 à 2 ans ayant séjourné à Taravao ou à Teahupoo pendant le passage du nuage, puis durant quatre heures par jour, est de l'ordre de 4,5 mSv en 1974. Dans ce cas, la dose efficace est due pour près de 50% à l'inhalation et pour près de 25% à l'exposition au dépôt.

La dose efficace pour un enfant vivant à Pirae ou à Papeete, dans des conditions de vie urbaines, est de l'ordre de 1 mSv. Elle est due, pour un tiers, à la consommation de lait et pour un tiers de végétaux.

La dose efficace maximale pour un adulte ayant séjourné à Taravao ou à Teahupoo, pendant le passage du nuage, puis durant quatre heures par jour, est de l'ordre de 3,6 mSv. L'inhalation contribue à plus de 50% à cette dose.

À Pirae, la dose efficace maximale pour un adulte est de 0,5 mSv, due, pour plus de 30%, à la consommation de végétaux. À Hitiaa, la dose efficace maximale pour un adulte, due, pour près de 50%, à l'exposition au dépôt, est de 2,6 mSv.

En 1974, une dose à la thyroïde, de l'ordre de 50 mSv, a pu être délivrée aux enfants âgés de 1 à 2 ans vivant à Hitiaa qui auraient consommé du lait produit localement.

Pour un adulte présent à Taravao ou à Teahupoo pendant le passage du nuage, puis durant quatre heures par jour, la dose à la thyroïde serait de l'ordre de 16 mSv et pour un enfant, la dose à la thyroïde serait de l'ordre de 40 mSv, pour plus de 60% à cause de l'inhalation des isotopes de l'iode.

À Pirae, les doses à la thyroïde sont dues pour 30% à la consommation de lait et de végétaux pour les enfants de 1 à 2 ans, et pour 40 % à la consommation de végétaux pour les adultes.

À Hitiaa, une dose de l'ordre de 12 mSv a pu être délivrée à la thyroïde des adultes, essentiellement à cause de la consommation de végétaux (40%) et à l'inhalation d'iode pendant le passage du panache (25%).

Les calculs de dose effectués avec l'ensemble des résultats de mesures environnementales et alimentaires disponibles ont permis d'estimer :

- la dose efficace aux adultes entre 0,5 et 3,6 mSv et la dose efficace aux enfants âgés de 1 à 2 ans entre 1,2 et 5,3 mSv.
- la dose à la thyroïde des adultes entre 4,4 et 16,2 mSv et la dose à la thyroïde des enfants âgés de 1 à 2 ans entre 14,1 et 48,7 mSv.

VI.6.6.4 - BILAN GLOBAL DES DOSES

Les expositions maximales de la population vivant en Polynésie française sont celles calculées pour les personnes résidant sur les îles de Tureia et de Tahiti, ainsi que dans l'archipel des Gambier (Tableau 72). Pour chaque essai indiqué, la dose efficace à l'adulte calculée après l'essai par le SMSR est indiquée dans la colonne 4. Les nouvelles estimations de dose effectuées en 2006 par le CEA pour les essais prépondérants, Aldébaran, Rigel, Arcturus, Encelade, Phoebé et Centaure, figurent en colonnes 5 à 8. Elles recoupent celles réalisées par le SMSR.

Les doses efficaces aux adultes dues aux retombées associées à cinq autres expérimentations : Umbriel, Toucan, Dragon, Rigel et Éridan ont également été estimées après essai.

TABLEAU 72.
Bilan des doses reçues par les populations des îles et atolls les plus exposés pour les essais dont les retombées ont été les plus importantes.

Lieu	Essai	Année	Estimation SMSR	Estimation CEA 2006 (mSv)			
			Dose efficace adulte (mSv)	Dose efficace enfant de 1 à 2 ans	Dose thyroïde enfant de 1 à 2 ans	Dose efficace adulte	Dose thyroïde adulte
Gambier	Aldébaran	1966	5,5	3 à 10	4 à 78	3 à 7	2 à 40
	Rigel	1966		0,4 à 0,71	4,6 à 7,8	0,1 à 0,23	1,1 à 2,1
	Éridan	1970	0,1				
	Toucan	1970	0,2				
	Phoebé	1971	1,2	0,5 à 7,9	4,8 à 98	0,2 à 2,6	1,3 à 26,7
Tureia	Rigel	1966		0,1 à 0,23	0,6 à 2	0,06 à 0,15	0,15 à 1
	Arcturus	1967	1	0,9 à 4	2 à 38	0,79 à 3,2	0,9 à 25
	Dragon	1970	0,16				
	Encelade	1971	1,3	1,5 à 3,5	4 à 27	1,3 à 1,9	1 à 8
Reao	Toucan	1970	0,15				
Hereheretue	Umbriel	1972	0,2				
Tahiti :							
Pirae	Centaure	1974	0,8	1,2	14	0,5	4
Hitiaa	Centaure	1974		5,3	49	2,6	12
Teahupoo	Centaure	1974		4,5	40	3,6	16

VI.6.6.5 - SUIVI RADIOLOGIQUE DES POPULATIONS

Dans le cadre de la surveillance radiologique de la population résidant en Polynésie, 25 campagnes de mesures anthropogammamétriques sur les populations des îles les plus proches des sites d'expérimentations ont eu lieu, entre 1966 et 1974 (Tableau 73).

La première campagne de mesures anthropogammamétriques des Îles Gambier, effectuée entre le 7 et le 16 juillet 1966, a porté sur 5 personnes résidant à Mangareva pendant le passage du nuage dû à l'essai Aldébaran. Les résultats des anthropogammamétries font apparaître une exposition interne par les radionucléides à vie courte, sans pour autant entraîner des doses efficaces supérieures à quelques centaines de microsieverts et des doses à la thyroïde supérieures à quelques millisievierts. Du 10 au 20 août 1966, une campagne de contrôle de la population a porté sur 223 personnes résidant dans l'archipel des Gambier. Les résultats de cette campagne effectuée un peu plus d'un mois après l'essai Aldébaran ont mis en évidence une très faible exposition interne pour 17 personnes et l'absence d'exposition interne pour les 206 autres. Deux autres campagnes, menées à Tureia du 4 au 13 juillet puis du 4 au 5 août 1967, à la suite de l'essai Arcturus ont mis en évidence que 14 et 28 personnes respectivement avaient un indice de tri supérieur à 5.

TABLEAU 73.
Résultats des campagnes de mesures anthropogammamétriques réalisées, entre 1966 et 1974, sur les populations les plus proches des sites d'expérimentatations.

Année	Lieu	Date	Nombre de contrôles en fonction de l'indice de tri		
			≤ 2	> 2 à ≤ 5	> 5
1966	GAMBIER	7 au 16 juillet			5
	GAMBIER	10 au 20 août	206	17	
	HAO	5 au 8 octobre	76	32	
	TUREIA	12 novembre	60		
	GAMBIER	6 au 12 décembre	307	3	
1967	PUKARUA	19 au 20 avril	93		
	REAO	21 au 22 avril	124	2	
	HAO	15 au 30 juin	70		
	TUREIA	4 au 13 juillet			14
	REAO	13 juillet	6		
	PUKARUA	18 juillet	6		
	TUREIA	4 au 5 août	25		28
1968	PUKARUA	2 et 3 avril	16	46	
	TUREIA	5 au 11 avril	15	30	1
	REAO	17 avril	22	44	
	VAIRAATEA	avril	5	7	
	HIKUERU	avril	12		
	ANAA	avril	19		
	GAMBIER	19 au 22 juin	51		
1970	TUREIA	21 octobre	47		
1971	TUREIA	16 au 19 avril	49		
	TUREIA	1 au 6 septembre	53		
1972	TUREIA	8 et 9 mai	50		
1973	TUREIA	18 et 19 avril	59		
1974	TUREIA	29 au 31 mai	52		

D'autres campagnes de mesures réalisées en 1968, plusieurs mois après la fin de la campagne 1967, ont mis en évidence un nombre significatif de contaminations associées à des doses de l'ordre de quelques centaines de microsieverts.

VI.6.6.6 - ÉVALUATION RADIOLOGIQUE DES ESSAIS SOUTERRAINS

Lors des essais souterrains, des barrières physiques ont été mises en place sur les câbles de liaison entre le conteneur et la surface associées à des dispositifs destinés à améliorer l'étanchéité des circuits pendant les phases de post-forage.

Lors des essais sous la couronne, des débits de doses significatifs étaient mesurés au niveau des dispositifs de prélèvement de gaz (cf. Chapitre II). Les doses reçues par les opérateurs, à une exception près, étaient inférieures à 0,5 mSv. Aucune exposition du personnel, présent à distance, sous le vent, n'a été mesurée.

Lors des essais réalisés sous lagon, en l'absence de risques d'exposition les dernières années, les missions de récupération des enregistrements s'effectuaient, sans tenues ni équipements particuliers ; elles restaient cependant encadrées par du personnel de radioprotection et disposaient de moyens de surveillance dosimétrique.

Au cours de certaines opérations de post-forage, quelques cas de contamination cutanée du personnel ont été constatés. Les activités atmosphériques en ^{131}I sur le chantier n'ont pas dépassé quelques $Bq.m^{-3}$ (cf. Chapitre II).

VI.7 - CONCLUSION

Durant toute la période d'exploitation du CEP, les efforts déployés par les expérimentateurs pour réduire autant que techniquement possible les risques d'exposition du personnel ou des populations ont été particulièrement importants et soutenus. C'est à la suite des essais atmosphériques que les doses les plus élevées ont été délivrées à quelques membres du personnel, en particulier lors des opérations de pénétrations pilotées dans le nuage radioactif, ainsi qu'aux populations des Gambier, de Tureia et de Tahiti, principalement par les retombées proches de six essais.

Le bilan de la surveillance de l'exposition externe des travailleurs du CEP montre que seule une infime partie du personnel, qui faisait l'objet d'une surveillance dosimétrique rigoureuse, a été exposée à des doses mensuelles supérieures au seuil d'enregistrement de 0,2 mSv. Près de 91% du résultat des mesures des dosimètres présentaient une dose nulle et seulement 3 doses ont été supérieures à 50 mSv.

Les 250 000 examens anthropogammamétriques et radiotoxicologiques effectués sur le personnel pendant la période des essais n'ont révélé qu'un nombre limité de cas de contamination qui n'ont conduit qu'à de faibles ou très faibles doses.

Les doses susceptibles d'être délivrées aux populations de trois îles de Polynésie par les retombées radioactives proches des six essais : Aldébaran en juillet 1966, Rigel en septembre 1966, Arcturus en juillet 1967, Encelade en juin 1971, Phoebé en août 1971 et Centaure en juillet 1974 ont été réévaluées en 2005-2006. Les activités de l'ensemble des radionucléides rejetés dans l'atmosphère par ces essais ont été estimées en prenant en compte les caractéristiques de chaque engin testé : puissance, matières nucléaires et matériaux utilisés. Les résultats des mesures de radioactivité effectuées dans l'environnement et les produits alimentaires des îles touchées par les retombées ont également été utilisés pour évaluer l'exposition des populations.

Ces expositions ont été estimées sous la forme d'intervalles de doses afin de tenir compte des incertitudes sur les conditions environnementales au moment des retombées et de la variabilité, parfois grande, des résultats de mesure en particulier sur les produits de la chaîne alimentaire. Les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle correspondent respectivement aux résultats de mesure d'activité les plus bas et les plus hauts obtenus sur les échantillons de l'environnement, en particulier au niveau des dépôts.

L'estimation des doses efficaces maximales pour les enfants a conduit à une valeur de 10 mSv, c'est-à-dire un niveau de dose qualifié de faible, pour lequel aucun effet stochastique n'est attendu. Celle des doses maximales à la thyroïde des enfants a atteint des valeurs de plusieurs dizaines de millisieverts : 78 mSv après l'essai Aldébaran aux Gambier en 1966, 98 mSv aux Gambier après l'essai Phoebé en 1971 et environ 50 mSv à Tahiti après l'essai Centaure en 1974.

Cependant, l'évaluation de ces doses est volontairement surestimée par la méthode de calcul utilisée et les valeurs des paramètres retenues en 2006. Les maxima doivent donc être considérés comme des valeurs qui ne pouvaient être qu'exceptionnellement atteintes. D'ailleurs, les résultats de mesures anthropogammamétriques effectuées à l'époque des essais, réexaminés aujourd'hui, ne confirment pas des niveaux d'exposition aussi élevés. Enfin, l'état actuel des connaissances et les données acquises, notamment lors de l'utilisation médicale d'iode radioactif pour des diagnostics de la thyroïde ou après les études épidémiologiques consécutives aux retombées radioactives de l'essai Bravo réalisé en 1954 par les États-Unis aux îles Marshall, montrent que ces niveaux de dose ne devraient pas conduire à l'apparition d'un nombre décelable de cancers de la thyroïde en excès dans les populations vivant en Polynésie.

VI.8 - BIBLIOGRAPHIE

COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE (1984). - Publications 40, Vol 14 n°2.

COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE. - Publications 66,

COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE (1995). - Publication 71 «age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides : Part 4, Inhalation dose coefficients, Vol 25 n°3-4.

COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE (1996). - Publication 72 «age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides : Part 5, compilation of ingestion and inhalation dose coefficients, Vol. 26 n° 1.

DIRECTIVE EUROPÉENNE 96/29. - Euratom du conseil du 13 mai 1996 «fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants»

GROUZELLE C., DOMINIQUE M., LAFAY F., DUCOUSSO R. (1985). - Résultats d'une enquête alimentaire effectuée à TAHITI de 1980 à 1982. Rapport CEA-R-5304.

KABIS de SAINT-CHAMAS L., BABLET J.P., ARNOULD C., DUCOUSSO (1991). - Evolution de la teneur en césium137 depuis 1967 dans l'eau de coco et le coprah en Polynésie française. Radioprotection, GEDIM 1991, Vol 26 (1) 75-80.

LEDERMANN S. (1965). - Niveaux de contamination radioactive du milieu ambiant et de la chaîne alimentaire. Contamination radioactive des denrées alimentaires – Détermination des niveaux admissibles. Association EURATOM – CEA Rapport CEA-R-2707

MECHALI, DOUSSET, PARDO et PENOT (1966). - Dose délivrée à la thyroïde produits de fission. Health Physisc, 12 15-27.

UNITED NATIONS (1958). - Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Official Records of the General Assembly, Thirteenth Session, Supplement No. 17 (A/3838). New York.

UNITED NATIONS (1972). - Ionizing Radiation: Levels and Effects. Volume I: Levels, Volume II: Effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York.

UNITED NATIONS (1977). - Sources and Effects of IonizingRadiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York.

UNITED NATIONS (1982). - Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York.

UNITED NATIONS (1988). - Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly,with annexes. United Nations, New York.

UNITED NATIONS (1993). - Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York.

UNITED NATIONS (2000). - Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York.

U.S. Environmental Protection Agency, Federal Guidance report 12, External exposure to radionuclides in air, water and soil. EPA-402-R93-081.

CHAPITRE VII

Assainissements, surveillance actuelle et évolution radiologique future

De la création du CEP à sa fermeture, les activités mettant en jeu des substances radioactives ont été menées en veillant au respect des limites d'exposition définies réglementairement, tant pour les travailleurs que pour les populations. La surveillance radiologique, constante au cours du temps sur les atolls d'expérimentations comme sur les autres atolls polynésiens, dont les principaux résultats ont été exposés dans les chapitres IV à VI de ce document, démontre la volonté de réduire au minimum l'impact radiologique des essais sur le personnel travaillant sur les atolls et les populations vivant en Polynésie.

En 1996, lors de l'arrêt définitif des essais nucléaires français, de nombreux projets de reconversion des sites ont été étudiés, pour préserver l'emploi du personnel de recrutement local et valoriser les investissements en installations et équipements. Il s'agissait notamment de conserver sur place le potentiel scientifique et technique, dans le cadre d'activités de recherche non nucléaires. Aucune solution de substitution techniquement satisfaisante et économiquement viable n'ayant été retenue, il a été décidé de démanteler l'ensemble des installations du CEP. Les infrastructures ont donc été démontées et les sites ont fait l'objet d'actions complémentaires d'assainissement, en particulier radiologique, afin d'éliminer les risques d'exposition après leur fermeture. L'objectif était de remettre l'environnement dans un état aussi proche que possible de celui d'origine, compte tenu des contraintes techniques. En effet, il n'était pas techniquement envisageable d'assainir les cavités-cheminées résultant des essais souterrains compte tenu de l'absence de risque radiologique.

Ce chapitre traite des plus importantes opérations d'assainissement d'installations et de remédiation de sols, dont l'objectif était de réduire les risques d'exposition radiologique pendant la période d'exploitation des sites. Il présente également les différentes actions réalisées à la fermeture du CEP afin de réduire les contraintes radiologiques futures. Ces assainissements ayant généré des déchets radioactifs, ce chapitre décrit leur gestion au cours du temps, en particulier, les opérations d'immersion en mer et d'enfouissement en puits à terre sur l'atoll de Mururoa. Ce chapitre rappelle également les principaux résultats des expertises concernant les risques géomécaniques et radiologiques après assainissement des sites, liés à la présence des radionucléides dans les cavités-cheminées et les sédiments des lagons des atolls de Mururoa et Fangataufa, réalisées à la demande de l'État français auprès de l'AIEA et de la Commission géomécanique internationale.

Enfin, ce chapitre décrit brièvement le dispositif mis en place pour assurer la surveillance de l'état radiologique et géomécanique des sites depuis la fermeture du CEP jusqu'à nos jours.

VII.1 - DÉMANTÈLEMENTS ET ASSAINISSEMENTS

Les opérations d'assainissement d'installations et de remédiation de sols étaient entreprises lorsqu'elles s'avéraient justifiées par des risques d'expositions radiologiques. Les plus importantes ont été conduites pendant la période d'activité des sites. Lors de la fermeture définitive du CEP, des opérations complémentaires d'assainissement radiologique ont été réalisées, dans le cadre du démantèlement des installations ayant contenu des substances radioactives, afin de les libérer de toute contrainte radiologique pour l'avenir.

Les déchets radioactifs générés par l'ensemble des assainissements ont fait l'objet d'une gestion adaptée, fonction de leur niveau d'activité et de la situation du site, en conformité avec les pratiques autorisées par la réglementation en vigueur au moment de leur élimination.

VII.1.1 - ASSAINISSEMENTS EN COURS D'EXPLOITATION DES SITES

À Mururoa, les dépôts au sol les plus importants ont été localisés en zone Faucon et dans le secteur Nord de l'atoll utilisé pour la réalisation des essais de sécurité (cf. Annexe 2). À Fangataufa, l'essentiel de ces dépôts se trouvait entre les zones Kilo et Empereur (cf. Chapitre IV). Ces zones ont rapidement fait l'objet d'importantes actions de remédiation afin de réduire les risques d'exposition du personnel pendant la durée d'exploitation des sites. Au final, pendant la période d'exploitation des sites d'expérimentations, ce sont six grandes opérations d'assainissement qui ont été menées, dont cinq sur l'atoll de Mururoa :

- le nettoyage de la zone Faucon, à la suite de la retombée de l'essai Parthénope ;
- le nettoyage de la zone utilisée pour les expériences Arpège ;
- l'assainissement de la zone Colette et de ses abords, lieu des expériences de sécurité,
- la récupération des particules contaminées en plutonium dispersées sur les plages de Mururoa suite aux dépressions tropicales qui ont touché l'atoll en 1981;
- l'assainissement et le démantèlement de l'installation Meknès ;
- la décontamination du PEE Empereur, sur l'atoll de Fangataufa, à la suite des retombées de l'essai Rigel.

Toutes ces opérations sont détaillées dans les paragraphes suivants, en commençant par celle réalisée sur l'atoll de Fangataufa.

VII.1.1.1 - ZONE PEE EMPEREUR

Les plus importantes retombées atmosphériques ayant touché les deux atolls d'expérimentations sont celles de l'essai Rigel réalisé à Fangataufa, le 24 septembre 1966, affectant les zones Kilo et Empereur. Le débit d'irradiation, à un mètre du sol, atteignait quelques gray.h^{-1}, une heure après l'essai. Cependant, des travaux de génie civil devaient être entrepris dans ces zones en juillet 1967, en vue de la campagne d'essais de 1968. Ces zones ont donc été assainies au cours du premier semestre 1967, afin que les expérimentateurs puissent travailler dans les zones techniques, sans aucune contrainte radiologique.

Les opérations d'assainissement et de remédiation ont été réalisées du 7 mars au 25 avril 1967 sur la zone Empereur, ses abords et ceux de la piste aviation. La zone Frégate n'ayant pas été touchée par les retombées a servi de base arrière, ainsi que le *BSL Rance* qui disposait des laboratoires, des installations de décontamination des personnels, des matériels et des infrastructures opérationnelles nécessaires.

Le terrain de la zone Empereur a été décapé au bulldozer, sur une vingtaine de centimètres d'épaisseur. Les déblais ont été regroupés sous forme de talus et les pourtours fixés par une émulsion de goudron, sur une quinzaine de mètres de large. Sur le terrain d'aviation, les sables et graviers ont été repoussés, par balayage et lavage sous pression, vers l'extérieur de la piste où ils ont été fixés par épandage d'une émulsion de bitume.

Les parties bétonnées de cette zone ont été soumises à un nettoyage poussé réduisant d'un facteur 20 le niveau de l'activité résiduelle. Toute trace de radioactivité a été éliminée des surfaces métalliques par abrasion de la couche la plus superficielle. Les surfaces peintes ont totalement été assainies par décapage de la peinture.

VII.1.1.2 - ZONE FAUCON

Lors de l'essai Parthénope, du 24 août 1973, des vents au sol soufflant est-nord-est avaient poussé les débris du ballon et de la nacelle vers le *motu* Faucon, où ils s'étaient déposés. Une première campagne de ramassage des débris radioactifs avait été réalisée à proximité des installations techniques, avant d'en autoriser l'accès. Les parties du *motu* dépourvues d'installation étaient restées en l'état.

Au début des années 80, des campagnes complémentaires de nettoyage se sont déroulées pour contrôler et assainir l'ensemble du *motu*. Le contrôle méthodique des sols a permis de récupérer les débris déposés, en particulier les morceaux du ballon. Ces déchets ont été mis en fûts et immobilisés dans une matrice de béton.

VII.1.1.3 - ZONE DES EXPÉRIENCES ARPÈGE

En 1970, en secteur Nord à l'ouest du PEA Denise, une douzaine d'expériences de physique ont mis en œuvre de l'explosif chimique et de faibles quantités (de l'ordre de quelques grammes) de plutonium. Ces expériences ont été effectuées par vent d'est afin d'éviter les retombées sur les installations techniques du PEA, où se trouvait l'instrumentation de mesure. Elles ont conduit à des retombées sur la zone Ouest du PEA, initialement dépourvue d'installations.

Le plutonium déposé à la surface du sol y a été fixé par une émulsion de goudron et, en certains endroits, recouvert d'agrégats de corail. Par la suite, une partie des surfaces coralliennes nettoyées a été bétonnée pour être utilisée comme zone industrielle, accueillant la station de décontamination des matériels, les alvéoles de stockage des explosifs et les puits de déchets.

Les déchets de remédiation sous forme d'agrégats contenant du plutonium, ont été entreposés temporairement dans une enceinte fermée appelée «boîte Arpège», avant leur tri et l'enfouissement des agrégats radioactifs dans les puits PS1 et PS3.

VII.1.1.4 - ZONE COLETTE

L'appellation Colette, en secteur Nord, recouvre le *motu* Colette et les portions de dalles coralliennes contiguës, à l'est, là où ont eu lieu les expériences de sécurité, aux points Ariel et Vesta. De 1966 à 1974, cinq essais de sécurité y ont été réalisés à l'air libre, conduisant au marquage en ^{239}Pu du sol de cette zone.

Après chaque essai, les débris les plus gros, situés autour du point zéro, étaient ramassés pour être mis en fûts et les particules résiduelles étaient fixées au sol par épandage d'une émulsion de goudron, afin d'empêcher toute remise en suspension par les vents. Pendant une dizaine d'années après l'arrêt des essais de sécurité, l'accès à ces zones a été réglementé et des actions complémentaires de nettoyage y ont été menées.

En 1981, la dépression tropicale Thamar touchait le secteur Nord de l'atoll et entraînait dans le lagon une dizaine de fûts stockés sur la zone Colette. Le contrôle des laisses de mer sur les plages mettait en évidence la présence de plutonium sur des débris flottants : bois, goudron, paraffine, plastique. Afin d'éviter toute exposition du personnel, il a été décidé de :

- traiter la zone Colette afin d'éviter une nouvelle émission de débris contaminés par du plutonium. En effet, la pellicule de goudron fixant initialement le plutonium s'était décollée de la dalle corallienne par les effets conjugués de la chaleur et de la houle, devenant une source d'émission de particules radioactives ;
- ramasser les particules radioactives déposées sur les plages.

Remédiation de la dalle

Préalablement à toute opération de remédiation, le niveau de l'activité surfacique résiduelle acceptable au plan sanitaire après assainissement, également appelé «seuil d'action», était déterminé par la Commission de sécurité des sites (C2S). Concernant la remédiation de la dalle, le seuil a été fixé à 10^6 Bq.m^{-2} en $^{239+240}$Pu, sur la base d'un scénario d'exposition conduisant à une dose inférieure à la limite de dose annuelle pour le public. Ce scénario concerne d'éventuels pêcheurs polynésiens qui seraient exposés en traversant le *motu* Colette, après assainissement, pour se livrer à leur activité de pêche. Cette valeur du seuil d'action est cohérente avec celles retenues pour les assainissements d'autres sites ayant subi des retombées radioactives, tels Maralinga (Australie), Palomares (Espagne) ou Enewetak (Îles Marshall).

Les opérations de remédiation de la zone Colette aux points Ariel et Vesta avaient pour objectif d'éviter de nouvelles dispersions de particules radioactives. Entre 1981 et 1985, plusieurs campagnes d'assainissement ont successivement été menées, mettant en œuvre différents moyens d'arrachage des résidus de bitume contaminés : bulldozer, marteau piqueur, jet d'eau sous pression et gratteuse à percussion.

À la fin de cette première série d'actions de remédiation, l'activité résiduelle en plutonium était essentiellement associée à la dalle corallienne. C'est pourquoi, en 1987, l'opération finale de réhabilitation a consisté à raboter la couche de surface de la dalle corallienne sur quelques centimètres d'épaisseur, au moyen d'une décapeuse à percussion. Cette action a été complétée par des opérations ponctuelles et localisées par marteau-piqueur. Les produits du décapage ont été récupérés dans des bennes étanches, en sortie d'un aspirateur à gros débit. L'ensemble des opérations de remédiation a généré quelque 1 500 m^3 de déchets et déblais, qui ont été stockés dans les puits PS1 et PS3.



Aspirateur «Vactrailer» permettant de récupérer les produits de décapage.

En 1988, l'activité volumique atmosphérique associée aux particules remises en suspension collectées dans cette zone était très faible, inférieure à 10^{-5} Bq.m^{-3}. L'activité résiduelle étant essentiellement incluse dans la dalle, aucune particule n'était détectable sur les chaussures des personnes circulant sur cette zone.



Système de détection aéroporté Hélinuc.

La situation radiologique finale a été établie par le système de détection aéroporté Hélinuc et par des mesures au sol, montrant que le seuil d'action avait été en moyenne atteint et que la radioactivité résiduelle totale en ^{239}Pu de cette zone terrestre s'établissait à $1,5.10^{10}$ Bq (cf. Chapitre IV). L'expertise de l'AIEA, réalisée en 1996, a déterminé des activités surfaciques légèrement supérieures mais du même ordre de grandeur. Les écarts s'expliquent par l'utilisation de méthodes et équipements différents pour les mesures de terrain. Aujourd'hui, la dalle corallienne indurée de la zone Colette affleure en surface et reste dépourvue de sol. Elle est impropre à toute culture et à toute activité humaine, y compris des activités de pêche.

Récupération des particules radioactives sur les plages

Les dépressions tropicales de 1981 entraînèrent l'arrachage de parties goudronnées de la zone Colette, la dispersion dans le lagon des débris radioactifs et leur échouage sur les plages du lagon de Mururoa. Le ramassage méthodique de ces débris sur les laisses de mer a commencé dès 1981. Priorité était donnée à la plage de la zone Martine, où le contrôle était quotidien, car il s'agissait de la seule plage véritablement fréquentée par le personnel. À chaque période de mauvais temps, ces particules flottantes étaient remobilisées et redistribuées sur les bords du lagon. De dimensions supérieures à 100 µm, elles avaient une activité alpha moyenne de l'ordre de 0,2 Bq. Le nombre de particules récoltées lors des contrôles réguliers des plages de la zone Martine était considéré comme un indicateur de l'évolution du volume de débris susceptibles d'être mobilisés. Ces ramassages étaient effectués par une équipe spécialisée, contrôlant systématiquement toute la plage avec un appareil portatif (Lon 307) capable de détecter les raies X du plutonium et gamma (59 keV) de l'américium-241 qui lui est associé (Fig. 188).

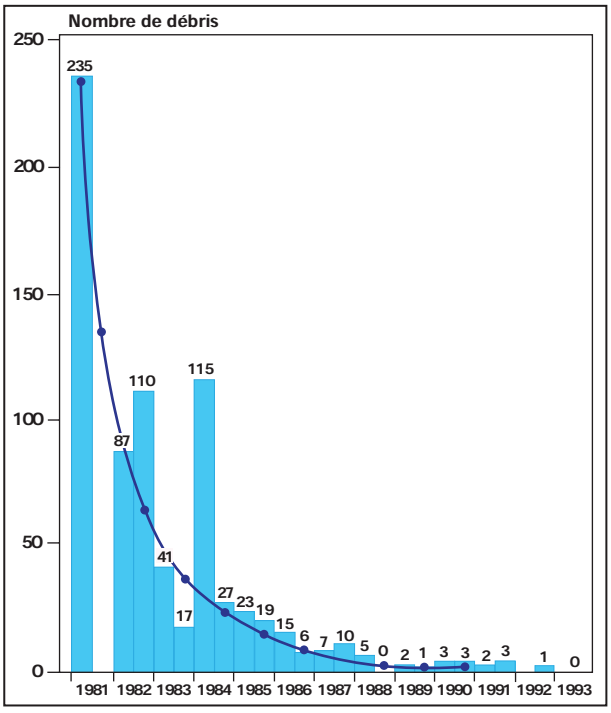
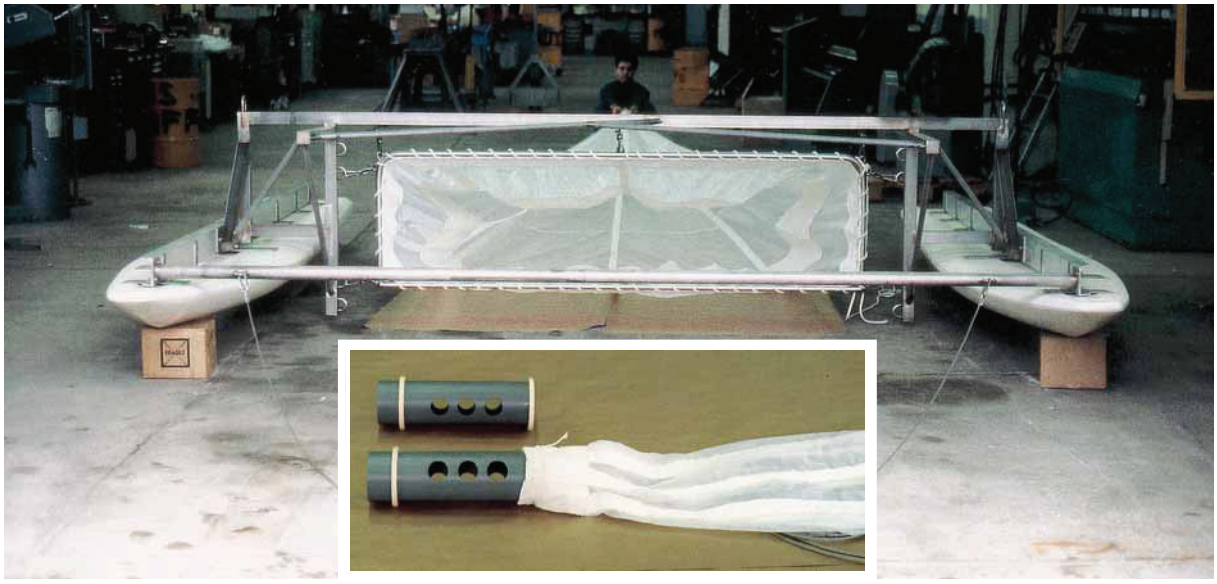


FIG. 188. - Histogramme des débris radioactifs collectés, à partir de 1981, sur les plages de la zone Martine de l'atoll de Mururoa.

Dans un premier temps, par précaution, le personnel effectuant ce travail s'équipait de combinaisons de protection anti-poussières. Le retour d'expérience a montré que la nature des particules et leurs caractéristiques physico-chimiques n'entraînaient pas de risque d'inhalation, ou d'ingestion directe, de plutonium. Le port de protections n'étant pas justifié, ces contrôles ont très rapidement été effectués en tenue de travail normale, une paire de gants étant suffisante pour se protéger de l'exposition lors du ramassage des débris après leur localisation. La collecte des particules le long des autres parties du rivage du lagon a été effectuée par campagnes. En 1986, des essais de récupération des débris flottant à la surface des eaux du lagon ont été entrepris, par temps calme, à l'aide d'un filet à plancton à embouchure semi-immergée. Une surface de 10 hectares a été prospectée sur des zones choisies en fonction des trajectoires les plus probables des débris, à partir du secteur Nord. Aucun débris radioactif n'a été collecté par le filet, confortant l'idée qu'il n'existait plus de transfert continu, depuis les *motu* de la zone Nord vers les plages ; mais une redistribution des débris, d'une plage à l'autre, lors de conditions météorologiques défavorables. À partir de 1989, les collectes ont été limitées aux zones du rivage sur lesquelles les débris se déposaient systématiquement après les périodes de mauvais temps. Les contrôles ont donc été adaptés à la fréquence de ces évènements météorologiques.



Filet à plancton à embouchure semi-immergée pour la récupération des débris flottant en surface du lagon (En médaillon, détail du collecteur de débris).

Durant toute cette opération, près de 50 000 débris ont été localisés et ramassés sur l'ensemble du rivage du lagon. Depuis 1994, aucun débris radioactif n'ayant été découvert sur les plages, il a été conclu que les travaux d'assainissement du secteur Nord étaient suffisants et que les débris émis avant l'opération de remédiation avaient été recueillis.

VII.1.1.5 - INSTALLATION MEKNÈS

Construite en 1977, en zone Denise, à proximité du PEA, l'installation Meknès se composait principalement d'une enceinte renforcée en béton contenant une cuve en acier. Elle a été utilisée en 1978 pour des expériences de physique, sans dégagement d'énergie nucléaire, mettant en jeu du plutonium associé à de l'explosif chimique. En 1979, lors de la dernière phase des opérations d'assainissement suivant une expérimentation, la déflagration des vapeurs des solvants utilisés lors du séchage du revêtement de surface a conduit au décès accidentel de deux personnes, l'une par anoxie, l'autre par l'onde de choc (cf. Chapitre VI).

Les premières opérations de démantèlement de l'installation ont démarré en 1982, avec le démantèlement du château de plomb faiblement contaminé, qui protégeait les équipements de mesure de l'installation. Isolés dans du béton, les éléments du château ont été immergés dans l'océan au dernier trimestre 1982, dans le respect des dispositions de la convention de Londres, après un accord ministériel formalisé. Ce fut la dernière immersion de déchets radioactifs réalisée au CEP.

La seconde opération d'assainissement a concerné le système de ventilation situé sur le toit de l'édifice. La dépose des gaines contenant des traces de plutonium s'est déroulée au cours du 1er trimestre 1983. L'habillage en scaphandre à adduction d'air, le contrôle des intervenants ainsi que l'évacuation des déchets étaient réalisés à partir de cabines permettant de contrôler l'accès à l'enceinte par une porte en acier de 5 tonnes. Des études ont été menées en 1991 et 1992 afin de terminer l'assainissement de la cuve en acier et, en particulier, d'éliminer les éclats perforants fichés dans la paroi métallique, pour éventuellement démanteler la cuve, voire l'enceinte de béton, dans des conditions normales de travail. Les modalités d'assainissement de la cuve, en scaphandre ventilé, ont reçu l'accord de la C2S, après examen du rapport de sûreté détaillant les opérations à mener. La décontamination de la cuve a été réalisée par sablage à sec, par projection d'eau chaude sur la paroi métallique et par carottage des fragments perforants inclus dans la paroi. Ces opérations ont été suivies d'un contrôle radiologique.



Vue des équipements autour de l'enceinte Meknès lors de l'assainissement.

L'activité des déchets extraits de l'enceinte a été établie à $3,7.10^{10}$ Bq de plutonium. Le volume des déchets générés a été de 110 m^3, répartis en fûts, viroles de béton ou vrac, en fonction du niveau de l'activité massique des déchets. Le facteur de décontamination global obtenu, supérieur à 10 000, a permis d'atteindre des niveaux d'activité résiduelle très largement inférieurs aux seuils fixés par la C2S et, par voie de conséquence, de proposer le déclassement de l'installation en usage normal, en octobre 1993.

En 1990, à la fin du chantier de décontamination de la cuve, un essai de sciage de l'édifice bétonné par câble diamanté en vue de sa déconstruction complète s'était avéré concluant. Toutefois, l'opération n'a pas été réalisée car le coût de la découpe de l'édifice entier n'apparaissait pas justifié, puisque l'installation ne présentait plus de risque radiologique.

Entre 1993 et 1996, les niveaux d'activité résiduelle de l'installation ont continué à être mesurés périodiquement. L'activité volumique atmosphérique alpha mesurée dans l'enceinte était de l'ordre de 10^{-5} Bq.m^{-3}, soit environ 1/10 000 de la limite dérivée de concentration atmosphérique (LDCA) du ^{239}Pu et l'activité surfacique labile était de l'ordre de 10^{2} Bq.m^{-2}, soit environ le quart de la valeur guide du CEA pour les matériels à usage normal (0,04 Bq.cm^{-2}).

En 1997, les ouvertures de la cuve ont été obturées pour en interdire l'accès afin d'éviter les chutes dans sa partie basse en cas de pénétration dans l'enceinte. Aujourd'hui, l'ouvrage est en respiration naturelle avec l'extérieur, par l'intermédiaire d'un filtre mis en place sur le toit, et ne présente aucune sujétion d'ordre radiologique.

VII.1.2 - ASSAINISSEMENTS EN FIN D'EXPLOITATION DES SITES

L'arrêt de toute activité sur les sites d'expérimentations a conduit au repli des matériels et des installations utilisables en Polynésie française ou en métropole. Il a également été procédé au démantèlement des installations devenues inutiles, susceptibles de se dégrader dans un environnement humide et salin agressif. Les actions suivantes ont été réalisées :

- le démontage ou la destruction des bâtiments et infrastructures inutiles en effaçant, si possible, la trace des installations par la plantation de cocotiers sur les emplacements libérés ;
- pour les ouvrages bétonnés, dont la destruction n'était pas financièrement envisageable, à savoir les PEA, PCT, PEE, BPV et Meknès, leurs accès ont été condamnés afin d'éviter les risques d'accident en cas de pénétration humaine ultérieure ;
- le rapatriement en métropole, ou la destruction, du stock existant de produits chimiques utilisés par les laboratoires ou dans le cadre d'activités industrielles ;
- le contrôle radiologique de toutes les barges opérationnelles, des apparaux de mouillage et des matériels de forage avant cession et, d'une manière générale, celui de tous les matériels en place dans les installations à caractère nucléaire, comme celles utilisées pour le stockage des sources radioactives, les laboratoires de radiobiologie, de mesures de radioactivité, etc.
- l'assainissement des installations à caractère nucléaire présentant une radioactivité résiduelle, à savoir la station de décontamination (Stadec), le bâtiment de traitement des solides (TDS) et les locaux du laboratoire de mesure, comme le L7 ;
- la fermeture définitive des têtes des puits d'essais de la couronne corallienne et du lagon ;
- le stockage des déchets radioactifs résiduels dans les puits dédiés.



Plantation de cocotiers, après démantèlement des installations du secteur Est.



PEA Denise après la condamnation des portes d'accès.

Ce document ne traitant que des pratiques ou des installations mettant en jeu des matières nucléaires, le paragraphe suivant se limitera à présenter un exemple de démantèlement d'installation avec assainissement radiologique, celui de l'installation de traitement des solides (TDS).

Le TDS était un bâtiment dédié au traitement des échantillons de lave radioactive prélevés dans les cavités-cheminées et à leur conditionnement avant leur expédition en métropole pour des analyses complémentaires. Il était constitué de deux cellules de très haute activité (THA), entourées de laboratoires et d'un local de décontamination.

Le démantèlement de cette installation a débuté après le traitement des échantillons issus du dernier essai réalisé, en janvier 1996, afin de profiter de la présence sur le site du personnel qualifié et des moyens de soutien associés. À cette date, l'installation était à un niveau radiologique dit de «fin de campagne», c'est-à-dire que les cellules THA et les différents laboratoires contigus étaient décontaminés. Il restait à assainir les gaines de ventilation reliant les équipements et locaux où étaient traités les échantillons : face arrière des cellules, laboratoires ayant renfermé des matières radioactives, salles de décontamination, vestiaire, etc. Pendant les opérations de démantèlement, la centrale d'extraction d'air a continué à maintenir l'atmosphère des locaux en dépression par rapport à l'extérieur, pour assurer le confinement de la radioactivité, tout en filtrant l'air rejeté au travers de caissons contenant des filtres de très haute efficacité.

La première phase a consisté, après contrôle et décontamination éventuelle, à évacuer les matériels et à démanteler les installations situées dans les locaux entourant le cœur de l'ouvrage, les cellules THA1 et THA2, tout en mettant à profit le confinement procuré par le système d'extraction et le dispositif de surveillance radiologique.

Dans une deuxième phase, il a été procédé au démontage et à l'évacuation des équipements présents dans les cellules THA, puis au démantèlement de leurs éléments structuraux : hublots de verre au plomb, revêtements des parois en acier inoxydable, plan de travail, protections en plomb, télémanipulateurs, portes blindées et divers équipements électriques et hydrauliques.

Dans une troisième phase, il a été procédé au démantèlement du système de ventilation-extraction, correspondant à une cinquantaine de mètres de gaines contaminées. Des poussières provenant du tronçonnage des carottes de prélèvement et du concassage des laves radioactives dans les cellules THA s'étaient déposées dans les gaines du système de ventilation en amont des filtres, et, principalement, dans leurs parties horizontales basses. L'estimation de ces dépôts de poussières, en prenant des hypothèses raisonnablement pessimistes, a conduit à une masse en ^{239}Pu de l'ordre du millionième de gramme et à une activité surfacique maximale de quelques dizaines de $Bq.m^{-2}$ de ^{239}Pu, valeur très inférieure à la limite de 400 $Bq.m^{-2}$ retenue au CEA pour le matériel destiné à un usage normal.

L'opération de dépose des gaines d'extraction a été effectuée en maintenant en fonctionnement le réseau d'extraction-filtration. Chaque tronçon de gaine a été contrôlé, éventuellement décontaminé, puis découpé. Les éléments dont l'activité surfacique résiduelle restait supérieure à 4.10^4 Bq m^{-2} (bêta, gamma) ou à 400 $Bq.m^{-2}$ (alpha) ont été gérés comme des déchets radioactifs, en fonction de leur niveau d'activité. Les matériels divers non contaminés ou décontaminés ont, après contrôle radioactif, été stockés avant d'être évacués.

VII.2 - GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Deux types de déchets radioactifs ont été générés par les activités menées au CEP : les déchets renfermant les radionucléides présents dans les mélanges de produits radioactifs résultant des essais nucléaires et ceux issus des expériences de sécurité, contenant de la matière fissile seule, en l'occurrence le plutonium (cf. Chapitre II). À ces déchets s'ajoutent ceux provenant des différentes opérations d'assainissement et de démantèlement menées lors du fonctionnement des sites d'expérimentations, puis à leur clôture.

VII.2.1 - ORIGINE DES DÉCHETS

Les résidus provenant des différentes opérations mettant en œuvre des matériaux radioactifs, ou résultant d'assainissement, étaient définis comme déchets. Ces déchets étaient constitués :

- des produits résiduels des installations de décontamination : le Centre d'intervention de décontamination (CID), le Centre de décontamination des aéronefs et des personnels (CDAP) à Hao, et les installations de décontamination du *BSL Rance,* pendant la période des essais atmosphériques ; puis de la Stadec (essentiellement matériel de post-forage), lors des essais souterrains à Mururoa ;
- des résidus issus des cellules THA de traitement des échantillons prélevés à des fins de diagnostic radiochimique des essais. Ces installations se situaient sur l'atoll d'Hao, durant la période des essais atmosphériques, puis à Mururoa pendant celle des essais souterrains ;
- du tartre provenant des circuits d'eaux de mer, en particulier des bouilleurs des bâtiments ayant séjourné dans les lagons de Mururoa et Fangataufa, peu après les essais sur barge réalisés en 1966 et 1967 ;
- des résidus des échantillons radioactifs traités dans les laboratoires d'analyses de Tahiti, de Hao et de Mururoa ;
- des principaux déchets radioactifs de démantèlement et des consommables (cotons, chiffons) utilisés lors des opérations de décontamination.

Ces déchets contenaient essentiellement des radionucléides émetteurs bêta-gamma issus du mélange initial des essais dont la décroissance radioactive suivait la loi décrite dans le chapitre II.

VII.2.2 - RÈGLES DE CLASSEMENT

Deux catégories de déchets ont été distinguées au CEP :

- Les déchets à vie courte, de période inférieure à 10 ans, contenant des radionucléides émetteurs bêta-gamma, dont les ^{140}Ba, ^{141}Ce, ^{144}Ce, ^{60}Co et ceux de période plus longue, proche de 30 ans, comme le ^{137}Cs et ^{90}Sr. Ces derniers représentaient une faible proportion du mélange au stade de déchet qui était donc constitué en majorité de radionucléides à vie courte. L'activité globale du mélange décroissant très vite, il en a été de même de l'activité des déchets associés, dont l'activité avait très largement décru après une dizaine d'années (cf. Chapitre II).
- Les déchets contenant des radionucléides émetteurs alpha à vie longue, essentiellement le ^{239}Pu, ^{240}Pu et ^{241}Am, ont été traités dans le cadre d'un stockage de longue durée.

Les conditions de traitement des déchets ont été définies par la C2S (Tableau 74).

TABLEAU 74.
Règles de classement et traitement des résidus solides.

Déchets		Exutoire	Conditionnement
Groupe I (émetteurs α)	Groupe II A et suivants (émetteurs β, γ)		
Am < 100 Bq.g^{-1} ou At < 5 kBq	Am< 100 Bq.g^{-1} ou At < 50 kBq	Excavations en zone corallienne terrestre	Aucun
100 Bq.g^{-1} < Am< 1 300 Bq.g^{-1} et At > 5 kBq	Am > 100 Bq.g^{-1} et At > 50 kBq	Zone sédimentaire des puits	Agrégats en vrac Fûts bétonnés
Am > 1 300 Bq.g^{-1} ou 1,85.10^{9} Bq.m^{-3} (Environ 80 mg de plutonium par fût de 100 litres)		Zone volcanique des puits PS1 et PS3	Agrégats en vrac Fûts bétonnés

Am : Activité massique rapportée à un volume de 100 litres
At : Activité totale d'une source isolée

VII.2.3 - CONDITIONNEMENT

Trois types de conditionnement des déchets radioactifs ont été mis en œuvre en tenant compte de leur activité massique.

Le premier conditionnement consistait à rassembler les déchets dans des sacs rouges en polychlorure de vinyle, fermés de façon étanche, et de les mettre dans des fûts de 100 litres remplis de béton (cf. photo ci-contre).



Un deuxième conditionnement consistait à positionner les fûts de 100 litres, centrés par des entretoises, dans des fûts de 225 litres, l'espace intercalaire était également rempli d'un coulis de béton (cf. photos et schéma ci-dessous).



Fût de 100 litres
dans un fût de 225 litres.

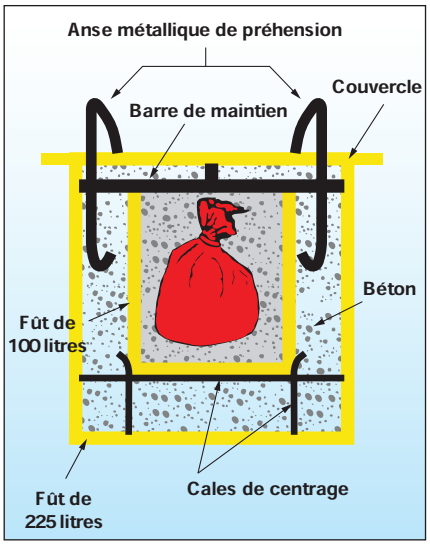
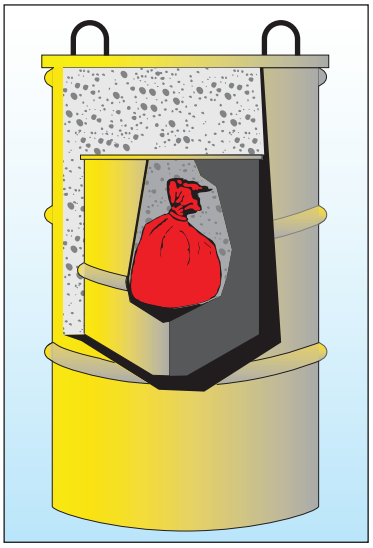


Schéma de conditionnement définitif
des résidus solides en fûts métalliques.

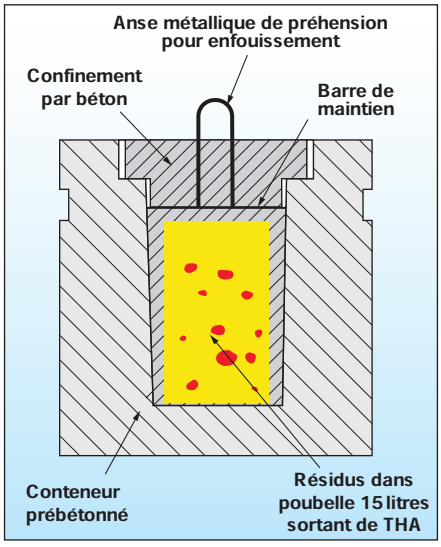


Conditionnement définitif
des résidus solides.

Enfin, des viroles en béton vibré étaient utilisées, principalement pour assurer le confinement des résidus provenant des cellules THA. L'espace intercalaire était également rempli d'un coulis de béton (cf. photos et schéma ci-dessous).



Conteneur THA
posé sur sa virole en béton.



Conteneur préfabriqué rempli de résidus
conditionnés dans du béton.



Sortie du conteneur
des cellules THA.

Le conditionnement se terminait par le remplissage des fûts et viroles qui, après séchage, étaient entreposés, avant d'être immergés en mer jusqu'en 1982 ou stockés sur terre, dans des puits dédiés (PS1 ou PS3).

Durant les quinze dernières années d'exploitation des sites, seuls les deux derniers types de conditionnements ont été utilisés. Les déchets conditionnés étaient dirigés vers la station de mesure des fûts de la Stadec, afin de quantifier leur niveau d'activité.

La comptabilité des déchets enfouis dans les puits était établie annuellement dans un document particulier appelé «rapport d'enfouissement», dans lequel, pour chaque colis référencé par un numéro d'identification, étaient associés sa masse, son contenu et l'activité mesurée.

VII.2.4 - CONTRÔLE DE L'ACTIVITÉ

Une station de mesure par spectrométrie gamma permettait d'identifier et de quantifier les radionucléides émetteurs gamma ainsi que les transuraniens présents dans les déchets.

Les conteneurs de déchets (fûts, viroles etc.) étaient entreposés sur une aire de stockage située dans une zone contrôlée avant d'être transférés, un par un, vers la station de comptage. Le conteneur était alors déposé à l'aide d'une pince sur un chariot se déplaçant sur un rail et équipé d'un plateau tournant pouvant recevoir les fûts de 100, 225 l ou les viroles de béton. Le chariot était transféré mécaniquement, plaçant le conteneur à mesurer en face du détecteur. La rotation du fût permettait de tenir compte de la position des déchets à l'intérieur du conteneur. Le conteneur était ensuite pesé.

La calibration était réalisée avec une source de test et différents écrans amovibles sous forme de disques rotatifs atténuateurs de 4 et 10 mm d'épaisseur. Ces derniers ont aussi été utilisés exceptionnellement comme écrans pour la mesure de déchets de haute activité. La station de mesures était initialement équipée de deux sondes NaI, puis de détecteurs Ge-HP. Un collimateur en plomb permettait de limiter la contribution des rayonnements diffusés.



Détail de la mesure d'un fût de 100 litres.



Aire de stockage des fûts de déchets en attente d'enfouissement, après mesure.

Le logiciel de mesure prenait en compte les conteneurs de formes géométriques diverses (fûts de 100 et 225 litres, viroles de béton, sacs de vinyle de 60, 100 et 200 litres, bidons de polyéthylène de 30 litres et flacons de 500 cm^3) ainsi que les matrices de remplissage (béton, sac de corail sec, sable de corail humide, sable de corindon, vinyle).

Les résultats de mesure et leurs incertitudes étaient donnés pour chaque colis comme suit :

- activité totale (Bq), activité massique moyenne ($Bq.kg^{-1}$) en ^{239}Pu et la masse totale en mg du plutonium contenu dans le colis ;
- activité totale alpha (Bq) ;
- activité totale des produits de fission (Bq) ;
- activité totale bêta-gamma du colis (Bq) ;
- activité résiduelle dans 300 ans (Bq).

La limite de détection du plutonium, dans une matrice de sable corallien, était de 20 MBq pour un temps de comptage de 5 400 secondes, soit de l'ordre d'une dizaine de milligrammes de plutonium dans un fût de 100 litres. L'activité alpha était généralement déduite des résultats de mesure de ^{241}Am. Pour les produits de fission, à titre d'exemple, la limite de détection du ^{137}Cs était d'environ 600 Bq par fût.

VII.2.5 - OPTIONS DE STOCKAGE

Pendant la période des essais atmosphériques, des déchets radioactifs de faible activité ont été immergés à grande profondeur dans l'océan, dans des zones définies géographiquement, conformément à la réglementation internationale résultant de l'application de la Convention pour la prévention de la pollution marine par l'immersion de déchets et autres matières, dite Convention de Londres, ratifiée par la France en 1977. À partir des années 80, adoptant des dispositions plus contraignantes que les recommandations de l'AIEA sur lesquelles s'appuient la Convention de Londres pour la question des immersions de déchets radioactifs, la Direction des centres d'expérimentations nucléaires (Dircen) n'autorisait plus les immersions. Exceptionnellement, fin 1982, une dernière opération de ce type a reçu une autorisation particulière et formelle du ministre de la Défense, dans le respect des recommandations internationales concernant les déchets radioactifs. Il s'agissait de déchets générés par le démantèlement de l'installation Meknès.

La gestion des déchets contenant des radionucléides émetteurs alpha était une préoccupation majeure au moment de la réalisation des expériences effectuées dans l'installation Meknès. Les déchets alpha générés par ces expériences ont été conditionnés dans des coques en béton ou des fûts bétonnés. Ils ont été stockés dans les deux puits de grand diamètre, forés profondément dans le basalte, jusqu'à près de 1 200 m, en zone Denise (PS1 et PS3).

VII.2.5.1 - IMMERSION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Dans ce paragraphe, le contexte réglementaire particulier des immersions en mer des déchets radioactifs est rappelé et les opérations d'immersions réalisées au large des atolls d'expérimentations sont détaillées, par site. Les États-Unis, l'URSS, la Nouvelle-Zélande et le Japon ont également immergé des déchets radioactifs dans l'océan Pacifique.

Cadre réglementaire

Les principales réglementations internationales et françaises, ainsi que les dispositions prises par la Dircen concernant l'immersion des déchets radioactifs solides, sont présentées chronologiquement dans ce paragraphe.

En 1958, la Conférence de l'ONU sur le droit de la mer adoptait une convention dont l'article 25 précise que «*tout État est tenu de prendre des mesures pour éviter la pollution des mers, due à l'immersion des déchets radioactifs*». Elle a également adopté une résolution recommandant que l'AIEA «*poursuive toute étude et prenne toute mesure pour aider les États à réglementer la décharge des matériaux radioactifs dans la mer*».

Ainsi, en 1960, l'AIEA publiait des recommandations pouvant servir de base à un accord international permettant de garantir qu'«*aucune évacuation de déchets radioactifs en mer n'impliquera un risque inacceptable pour l'Homme*». L'AIEA considérait que «*dans des conditions contrôlées et bien déterminées, les déchets solides de faible et moyenne activités peuvent être évacués sans risque dans la mer*». L'agence recommandait que «*seules devront être envisagées les méthodes de rejet permettant de limiter le rayonnement à un niveau ne comportant pas de risque inacceptable pour la population*». Elle considérait que 1/25^{e} de la dose générique (0,2 mSv.an^{-1}) pouvant affecter l'ensemble de la population devrait être réservé pour les rayonnements provenant de sources marines qui échappent au contrôle national. L'agence recommandait que «*tous les rejets de déchets radioactifs dans la mer, à l'exception de ceux qui proviennent du fonctionnement de navires nucléaires, devraient être faits à des emplacements fixés à l'avance, et dans des conditions prescrites pour l'emplacement considéré*».

En 1965, un groupe d'experts de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE a réalisé une évaluation de la sûreté des opérations d'immersion et fixé les premières limites d'activité massique des déchets pouvant être immergés, à :

- 37 GBq.t^{-1} pour les radionucléides émetteurs alpha (dont les isotopes du plutonium) ;
- 3,7.10^{3} GBq.t^{-1} pour les radionucléides émetteurs bêta-gamma de période supérieure à six mois.

En 1967, la Dircen approuvait les procédures d'immersion des déchets radioactifs solides en provenance de Hao qui tenaient comptent des recommandations et limites fixées par l'OECD/AEN et reprises par l'AIEA.

En 1972, la Convention de Londres sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion des déchets était ratifiée par 37 pays, dont la France qui en a appliqué les dispositions à partir de 1977. La convention a chargé l'AIEA du secrétariat technique pour ce qui concerne la question particulière de l'immersion des déchets radioactifs. L'AIEA était chargée de redéfinir les déchets dont l'immersion en mer était interdite, ainsi que les conditions dans lesquelles l'immersion des autres déchets radioactifs pouvait être autorisée. Il faut noter que la France, lors de la signature de la Convention de Londres, s'est réservé le droit de ne pas appliquer les dispositions de cette convention «*si celle-ci était interprétée comme faisant obstacle à des activités estimées nécessaires à la défense nationale*».

En 1978, l'AIEA présentait à la Convention de Londres la définition des déchets dont l'immersion en mer était interdite ou soumise à l'obtention d'un permis spécial délivré par une autorité nationale.

- Étaient interdits à l'immersion, les déchets «fortement radioactifs», c'est-à-dire ceux dont l'activité massique excédait :
  - → 37 GBq.t^{-1} pour les radionucléides émetteurs alpha ;
  - → 3,7.10^{3} GBq.t^{-1} pour les radionucléides émetteurs bêta-gamma, de période supérieure à six mois ;
  - → 3,7.10^{7} GBq.t^{-1} pour les radionucléides émetteurs bêta-gamma, de période inférieure à six mois et le tritium.

- Étaient autorisés à l'immersion, sous réserve de la délivrance d'un permis spécifique par une autorité nationale compétente, les déchets dont l'activité massique était inférieure à ces limites, sous réserve que :

  - → les immersions ne soient pas effectuées dans les mers marginales ou intérieures, mais à des profondeurs excédant 2 000 mètres, dans des zones strictement limitées de superficie inférieure à 10^{4} km^{2} ;
  - → les conteneurs des déchets soient prévus pour résister à la pression, pendant leur descente jusqu'au fond ;
  - → les opérations d'immersion satisfassent aux prescriptions fondamentales de la radioprotection, basées sur le principe de limitation des doses engagées ;
  - → les activités immergées n'entraînent aucun risque pour la santé des populations des pays riverains.

En 1981, la Dircen, avec l'approbation du Haut-Commissaire à l'énergie atomique, décidait d'arrêter à terme les immersions de déchets radioactifs solides dans l'océan. En 1982, la dernière opération était réalisée après accord de la Commission consultative de sécurité (CCS) pour l'élimination des déchets radioactifs solides, volumineux, issus des opérations d'assainissement de la zone Nord.

En 1986, la Convention de Nouméa, relative à la prévention de la pollution de la région du Pacifique Sud résultant de l'immersion de déchets, édictait, dans ses articles 10 et 11, une interdiction absolue d'immersion de déchets et autres matières radioactives.

Tenant compte du contexte réglementaire, de la diversité des types de déchets, des zones d'entreposage et des modalités possibles de réalisation des opérations d'immersion, la Dircen a délimité deux sites d'immersion à proximité de l'atoll de Mururoa et un autre au large de l'atoll de Hao (Fig. 189 et 190).

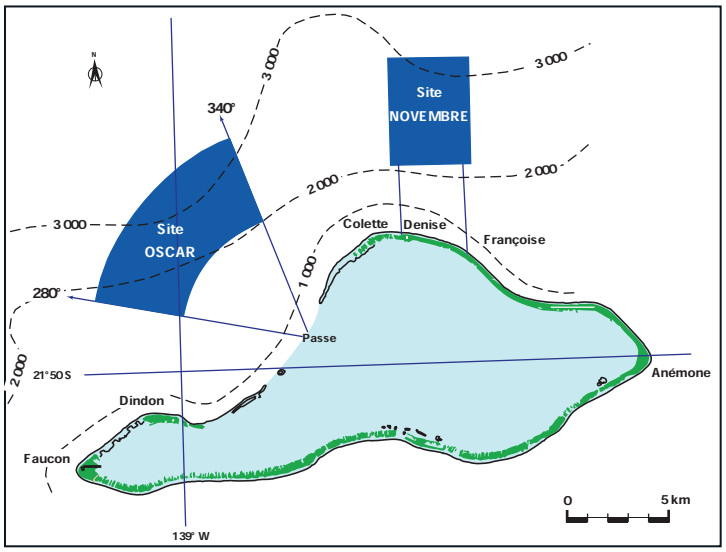


FIG. 189. - Emplacement des sites d'immersion au large de Mururoa et caractéristiques des déchets immergés.

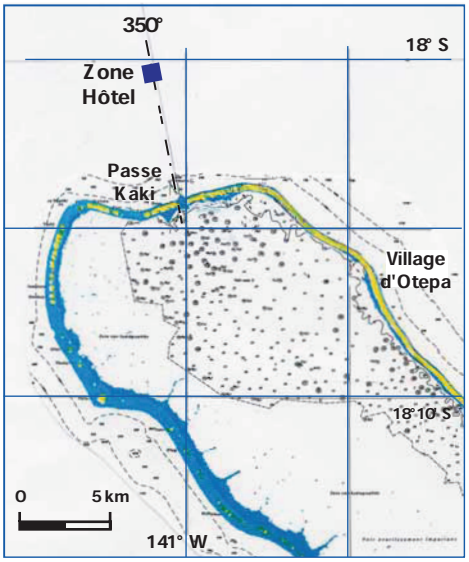


FIG. 190. - Emplacement du site d'immersion Hôtel, au large de Hao.

Site d'immersion Novembre

Le site Novembre est situé au nord d'une ligne allant des zones Françoise à Denise, à une distance de l'atoll de Mururoa de 2 à 4,5 nautiques, entre les isobathes 2 000 et 3 000 m (Fig. 189).

Ce site, d'une surface d'environ 20 km^2, a été utilisé pour l'immersion de déchets à partir d'hélicoptères. Il a été choisi au plus près de la zone Denise afin de limiter les distances des héliportages pour atteindre des fonds supérieurs à 2 000 m.

Entre 1972 et 1975, 76 tonnes de déchets radioactifs non conditionnés, essentiellement des éléments de tours et de gros débris métalliques provenant des essais de sécurité pratiquées en zone Denise, ont été immergés, en vrac, au cours de cinq opérations d'immersion héliportées.

- L'activité totale des radionucléides émetteurs alpha (plutonium) contenus dans les déchets a été estimée à 7.10^9 Bq, avec une activité massique moyenne de 0,09 GBq.t^{-1}.
- L'activité des radionucléides émetteurs bêta-gamma a été estimée à 4.10^6 Bq. Il convient d'y ajouter l'activité non mesurée des produits de fission accompagnant la matière fissile. Un ordre de grandeur de cette activité a été déduit du rapport entre l'activité des radionucléides émetteurs bêta et celle des émetteurs alpha estimés 1 heure après l'essai. Connaissant les dates d'immersion des déchets métalliques (1 à 5 jours après l'essai), le calcul conduit à une activité totale des produits de fission associés au plutonium dans les déchets immergés exprimée un jour après l'essai, de l'ordre de 10^9 Bq, avec une activité massique moyenne de 0,013 GBq.t^{-1}.

Site d'immersion Oscar

Le site Oscar a été utilisé pour des immersions réalisées à partir de bateaux ou de barges (Fig. 189). En forme de segment de couronne, il est situé de 3 à 5,5 nautiques des bouées de la

passe de Mururoa, entre le 280° et le 340°. Ce site, d'une surface de l'ordre de 60 km^2, a été choisi au plus près de la passe.

Entre 1974 et 1982, 2 580 tonnes de déchets radioactifs, conditionnés en conteneurs béton (1 280 tonnes) ou non conditionnés, ont été immergés entre les isobathes 2 000 et 3 200 m au cours de 14 campagnes d'immersion par bateaux. Ces déchets provenaient des opérations d'assainissement du secteur Nord de l'atoll et des premiers post-forages.

- L'activité totale des radionucléides émetteurs alpha (Pu), contenus dans les déchets, est estimée à 6.10^{10} Bq, avec une activité massique moyenne de 0,023 GBq.t^{-1}.
- L'activité totale des radionucléides émetteurs bêta-gamma, essentiellement des produits de fission, immergée est estimée à 6.10^{9} Bq, avec une activité massique moyenne de 0,0023 GBq.t^{-1}.

Entre 1984 et 1986, quatre campagnes d'immersion de déchets volumineux provenant de la fin des opérations d'assainissement du secteur Nord ont été menées sur ce site. Elles ont exclusivement concerné des matériels, engins lourds, cabines, etc., préalablement décontaminés à des niveaux compatibles avec la limite réglementaire pour le public.

Site d'immersion Hôtel

Le troisième site d'immersion dénommé Hôtel, d'une surface d'environ 1 km^2, est situé à 4 nautiques, dans le 350° de la passe Kaki, au nord de l'atoll de Hao, dans une fosse océanique de 2 500 m de profondeur moyenne (Fig. 190).

Entre 1967 et 1975, 532 tonnes de déchets radioactifs ont été immergées, 310 conditionnées en fûts de béton et 222 non conditionnées. Une partie de ces déchets provenait du traitement des échantillons prélevés dans les nuages générés par les essais atmosphériques. Ils ont été immergés au cours de 19 campagnes d'immersion par bateaux.

- L'activité totale des radionucléides émetteurs bêta-gamma, due essentiellement aux produits de fission contenus dans les déchets lors de leur immersion, est estimée à $1,5.10^{10}$ Bq, dont environ un tiers provenant des fusées et avions utilisés pour les prélèvements d'échantillons dans les nuages associés aux essais atmosphériques. L'activité résiduelle a été estimée à 10^{8} Bq pour l'année 2000, avec une activité massique moyenne de 0,028 GBq.t^{-1}.
- L'ordre de grandeur de l'activité totale des radionucléides émetteurs alpha peut être estimé à partir des rapports théoriques entre les radionucléides émetteurs bêta/alpha dans les nuages, exprimés 1 heure après l'essai. En tenant compte du temps écoulé entre la date de l'essai et celle de l'immersion des déchets, compris entre neuf et quinze mois, un calcul conduit à un rapport entre l'activité des radionucléides émetteurs bêta et celle des émetteurs alpha, ramené au jour suivant l'essai, compris entre 500 et 5 000 et, en corollaire, une activité des radionucléides émetteurs alpha, due aux isotopes du plutonium, de l'ordre de 3.10^{7} Bq, avec une activité massique moyenne de 0,000056 GBq.t^{-1}.

Les valeurs des activités totales en alpha et bêta-gamma, comparées à celles des limites préconisées par l'AIEA, montrent que les déchets radioactifs étaient des matériels individuellement peu contaminés. Le niveau du tonnage de déchets immergés est dû à l'importance des masses des outils et engins lourds, ainsi qu'aux matériaux de conditionnement en béton et en acier, qui furent immergés dans le strict respect de la réglementation internationale en vigueur au moment des immersions.

VII.2.5.2 - ENFOUISSEMENT DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Deux puits, PS1 et PS3, ont été forés spécifiquement pour l'enfouissement des déchets contenant des radionucléides émetteurs alpha. En complément, les parties supérieures de 25 puits forés pour réaliser des essais sous la couronne terrestre ont été utilisées pour enfouir des déchets très faiblement radioactifs.

Puits de stockage PS1 et PS3

Des déchets contenant des radionucléides émetteurs alpha, conditionnés dans des fûts, des viroles ou en vrac, ont été stockés dans les puits PS1 et PS3 forés dans le secteur Nord de l'atoll de Mururoa. Ces puits ont des diamètres supérieurs à ceux des puits d'essais afin d'augmenter leur capacité de stockage ; un diamètre de 82 pouces, soit environ 2 mètres pour PS1, et de 72 pouces, soit environ 1,8 mètre pour PS3 (Fig. 191). Ces deux puits ont été forés jusqu'à une profondeur d'environ 1 200 mètres et traversent la zone carbonatée, entre la surface et - 450 m, ainsi que la zone basaltique de - 450 m à - 1 150 m. Le puits PS2 n'a jamais été foré, car sa position prévue a été finalement considérée comme trop proche de celle de PS1. En effet, la technique de forage en *air-lift* utilisée crée une circulation d'eau ascendante dans le puits, pouvant accélérer la mobilité des radionucléides stockés dans PS1. Par précaution, le second puits foré, appelé PS3, a été réalisé quelques centaines de mètres plus loin, à l'ouest de PS1.

L'enfouissement des déchets était réalisé par campagne, généralement annuelle. Le périmètre des puits était classé zone contrôlée pendant la durée des opérations d'enfouissement des déchets les plus radioactifs. Lors de ces opérations une zone contrôlée était établie autour de la tête de puits. Le personnel y accédait à partir d'une cabine vestiaires-douches. Pendant toute la durée des opérations de transport sur zone et d'enfouissement, un contrôle atmosphérique était réalisé sous le vent de la tête de puits à l'aide d'un appareil de prélèvement d'air d'un débit de 100 $m^3.h^{-1}$.

Les colis contenant les déchets étaient descendus à l'aide d'un câble au fond des puits. La profondeur était connue en permanence grâce à une poulie compteuse. Lorsque le colis atteignait le fond du puits, le câble était remis en tension et le fût libéré à l'aide d'un largueur acoustique.

Les agrégats radioactifs ont été transportés de la zone d'entreposage aux puits, par bennes fermées, accompagnées par un véhicule de radioprotection. À la sortie de la zone contrôlée, l'extérieur de la benne et du véhicule faisaient l'objet d'un contrôle radiologique. Les agrégats, dont l'activité totale alpha était supérieure à $1,9.10^9$ $Bq.m^{-3}$, soit 1 300 $Bq.g^{-1}$ pour une densité de 1,4, ont été enfouis dans le tronçon basaltique du puits et, ceux d'activité massique inférieure dans celui traversant le massif calcaire. Le déversement des agrégats était effectué en vrac dans le puits, dont la tête était équipée d'une trémie. Pendant le déversement, un arrosage en pluie limitait la mise en suspension de particules. Le personnel participant à l'opération était équipé de combinaisons et de masques.



Déversement des agrégats dans le puits

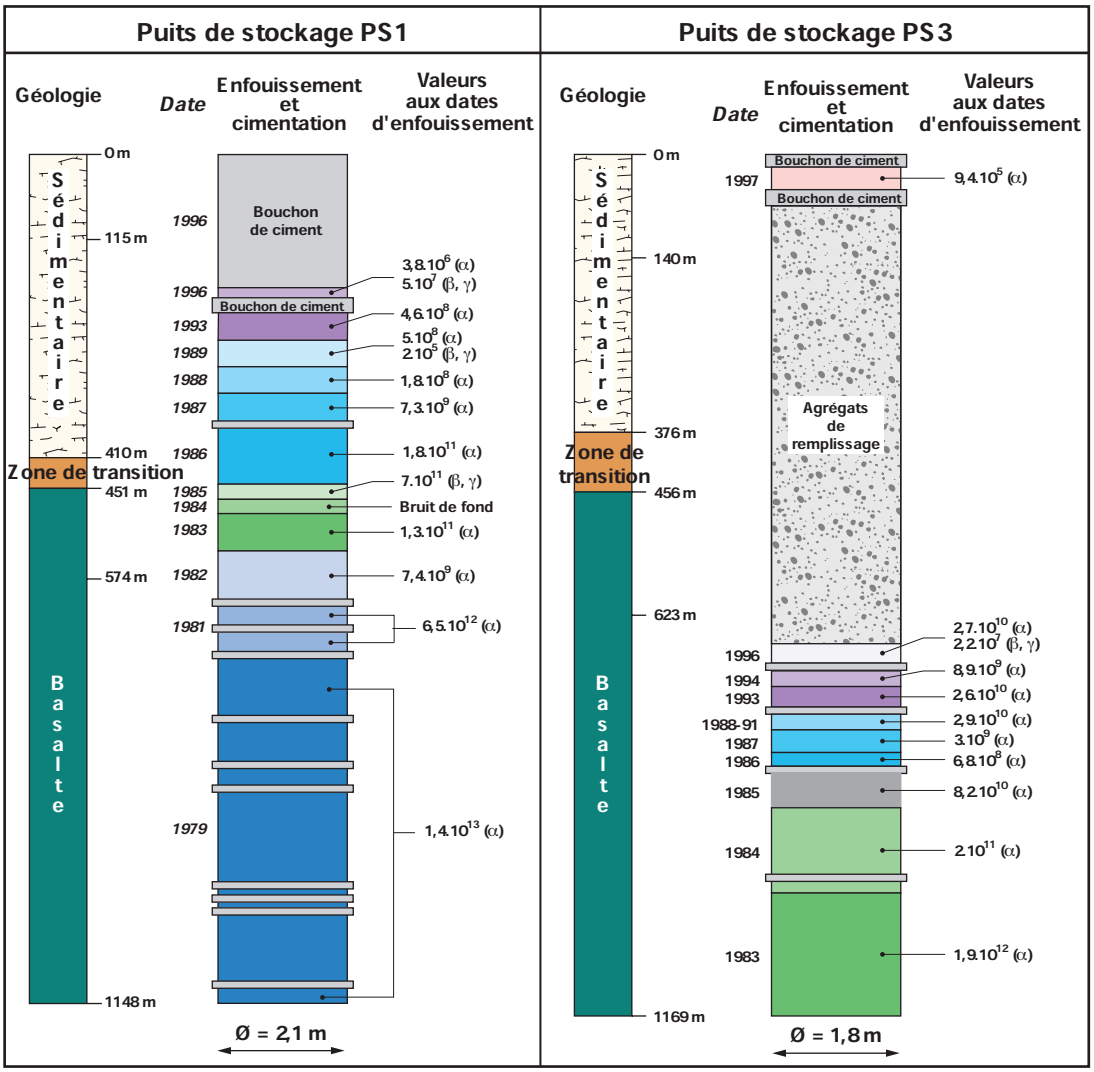


FIG. 191. - Coupe verticale schématique des puits, avec les indications d'ordre géologique, les activités enfouies et la position des bouchons de ciment cloisonnant les puits. La quasi-totalité de l'activité est enfouie dans la partie volcanique.

Des bouchons de ciment de plusieurs mètres d'épaisseur ont été coulés entre les déchets, constituant des barrières supplémentaires. En fin d'exploitation du CEP, les puits ont été obturés jusqu'en surface à l'aide de bouchons d'agrégats de corail et de ciment. Les activités massiques des radionucléides émetteurs alpha présents dans les déchets enfouis dans ces puits sont de l'ordre de 37 GBq.t^{-1}.

L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) prend en compte ce stockage dans l'inventaire géographique des déchets radioactifs (Fig. 192).

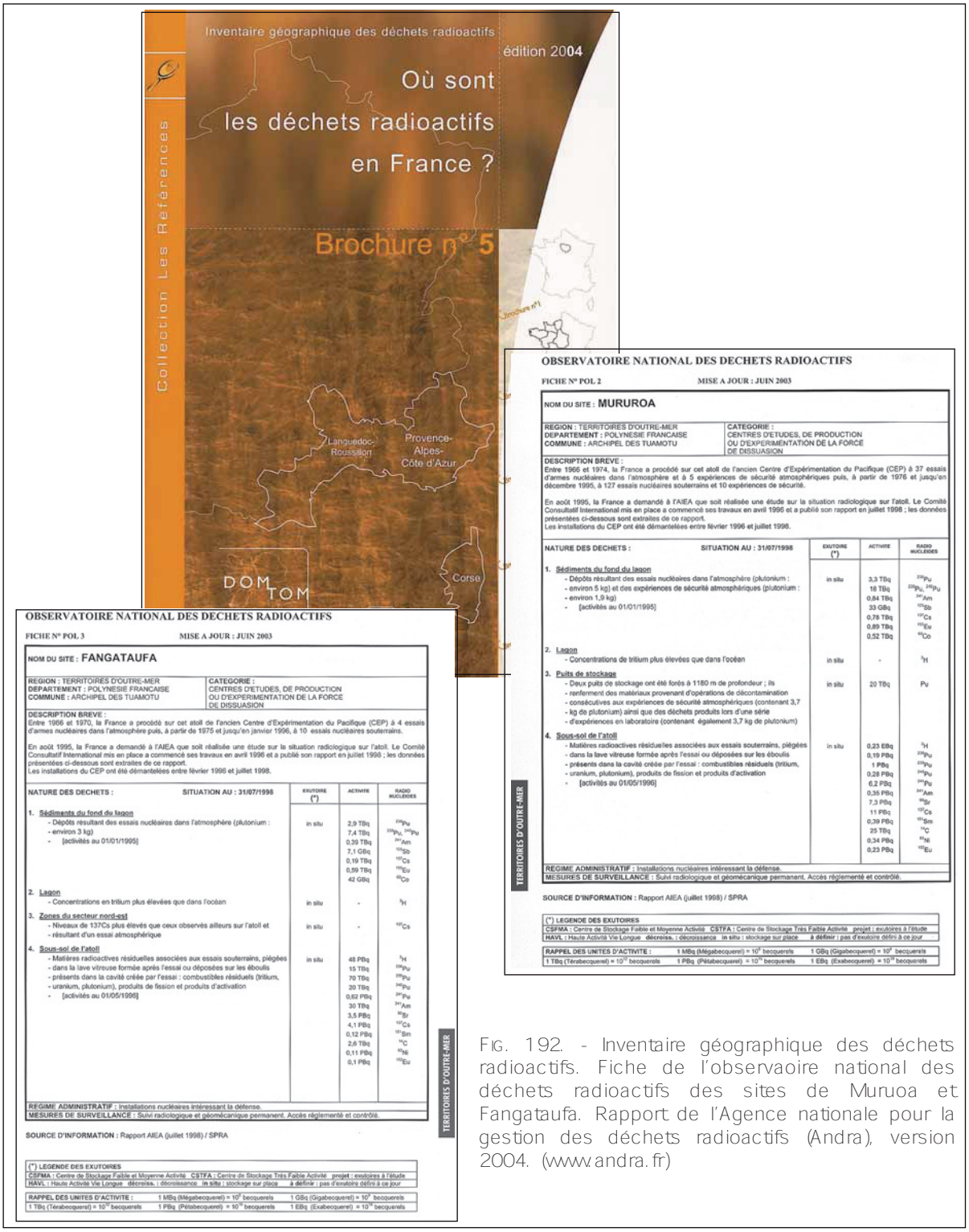


FIG. 192. - Inventaire géographique des déchets radioactifs. Fiche de l'observaoire national des déchets radioactifs des sites de Muruoa et Fangataufa. Rapport de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), version 2004. (www.andra.fr)

Puits annexes

La partie supérieure des premiers puits réalisés pour les essais souterrains était initialement obturée en totalité. Cette obturation jouant un rôle négligeable sur la tenue mécanique du terrain au moment de l'explosion a très vite été abandonnée puisqu'elle ne contribuait pas à la sécurité de l'essai. Ainsi, au fil des ans, 25 puits situés sur la couronne terrestre sont restés en eau libre, sur une hauteur de plusieurs centaines de mètres, de la zone de transition basalte-calcaire, jusqu'à la surface de l'atoll. À partir de 1981, la partie supérieure de ces têtes de puits, accessibles par voie terrestre, a été obturée à l'aide des matériaux ayant des niveaux d'activité inférieurs aux limites imposant leur stockage dans les puits PS1 et PS3.

Les activités résiduelles de ces déchets sont aujourd'hui négligeables, de l'ordre de 3,7 $Bq.g^{-1}$ en radionucléides émetteurs alpha et en bêta-gamma, soit entre le centième et le millième des activités massiques stockées en surface dans le centre de stockage de la Manche de l'Andra.

VII.3 - RISQUES ASSOCIÉS AUX ESSAIS SOUTERRAINS

Afin de remettre l'environnement des sites dans un état aussi proche que techniquement possible de leur état d'origine, l'ensemble des puits creusés dans la couronne récifale et au fond du lagon de Mururoa de Fangataufa ont été rebouchés. Après l'assainissement des sites, une évaluation des conséquences radiologiques a été réalisée. Les résultats de cette évaluation ont été confortés en 1996 par une expertise de l'AIEA sur les risques radiologiques associés aux résidus radioactifs piégés dans les cavités-cheminées, conjointement à l'étude menée par la Commission géomécanique internationale de différents scenarii possibles de l'évolution géomécanique des atolls.

VII.3.1 - REBOUCHAGE DES PUITS D'ESSAI

L'ensemble des puits, des forages de grand diamètre (FGD), des post-forages et des forages de mesures physiques, ont été rebouchés jusqu'au niveau du sol ou du fond du lagon. Cette opération a débuté en 1995, à partir de l'inventaire complet de l'état des 392 forages, tous types confondus. Pour remplir l'objectif de désengagement des atolls pour la fin de l'année 1996, les opérations de rebouchage des puits ont été menées en deux phases, tenant compte des moyens disponibles sur sites. La première phase a concerné le rebouchage des puits à terre, la seconde celui des puits sous-marins dans le lagon.

VII.3.1.1 - PUITS À TERRE

Les opérations de rebouchage sur la couronne de Mururoa ont concerné 76 puits. Menées de 1995 à octobre 1996, elles ont consisté à reprendre, à l'aide d'un engin de levage, la mordache d'appui, le câble porteur et les câbles mesures et à les relever, après coupure, dans la partie supérieure libre du puits. La partie tubée du puits dépassant la dalle corallienne a été recépée, par découpe au chalumeau, ou à l'explosif en cas de trop grand dépassement. La partie supérieure du puits, remplie d'eau, a ensuite été comblée par des agrégats sur lesquels ont été coulés un bouchon en béton et une dalle ferraillée. Les ouvrages de génie civil existant en périphérie du puits ont été détruits à l'explosif et les parties cavées bétonnées.

Dans la zone Sud, une douzaine de puits n'étaient accessibles qu'après réfection de la route, ou par le lagon. Deux d'entre eux, situés sur une partie semi-submergée du platier ont nécessité l'intervention de plongeurs pour la réalisation des opérations d'oxycoupage, sous 1,50 m d'eau.

En 1995, les travaux sur les différents types de puits ont été réalisés à Fangataufa. Les superstructures des FGD ont été détruites, le tubage d'acier découpé à l'explosif, les caves remblayées avec des débris coralliens et obturées par des bouchons de béton ferraillés de 40 cm d'épaisseur. Les forages périphériques ont été traités en fonction des ouvrages de génie civil qui leurs étaient associés, à savoir :

- curage de la cave, démolition à l'explosif de la tête du puits, remblaiement avec du corail et coulage d'un bouchon de béton armé ; ou
- curage autour du tube, découpe au chalumeau du tubage et coulage d'un bouchon en béton armé.

VII.3.1.2 - PUITS SOUS-MARINS

Le rebouchage des puits, en particulier ceux du lagon de Mururoa, a été réalisé suivant une méthode générale. Les câbles porteurs et les câbles mesures étaient sectionnés à l'aide d'une cisaille hydraulique ou d'un dispositif pyrotechnique, un obturateur gonflable (*packer*) était descendu dans le tubage, sous la tulipe de l'entrée du puits et était gonflé. Il servait de support à un bouchon composé d'agrégats de corail. En fin de remplissage, dans la partie supérieure du puits jusqu'au fond du lagon ou de la tulipe quand elle subsistait encore, le bouchon était constitué d'un coulis de béton de quelques mètres d'épaisseur. La partie supérieure des câbles sectionnés étant rabattues dans la partie libre du puits, elle se retrouvait emprisonnée dans le bouchon de ciment. La tulipe était relevée, chargée sur un engin flottant afin d'être ramenée à terre pour être détruite.

Les puits des essais de la dernière campagne (1995-1996) ont fait l'objet d'un remplissage complet avant essai, amenant le sommet du béton dans le puits à quelques dizaines de mètres du fond du lagon afin de simplifier la pose du bouchon définitif après l'essai. Dès l'origine, les post-forages ont été systématiquement obturés après chaque opération. Pour mener à bien ces opérations, les moyens classiques de forage et de remplissage des puits ont été utilisés : barge de forage et de manutention, barge de cimentation et de transport d'agrégats, barge Flocons aménagée à cet effet.



Barge de forage et de manutention, BFM



Barge de cimentation et de transport d'agrégats, Cimagré

À Fangataufa, un traitement correctif a été appliqué pour rétablir le paysage sous-marin environnant les puits ayant subi des effondrements sédimentaires sous forme de cratères de subsidence. Après affouillement par circulation d'eau à fort débit, ces cratères ont été comblés par injection d'un coulis de ciment pour rétablir la cohésion du tubage du puits avec le terrain. L'injection se poursuivait jusqu'au débordement du ciment dans le fond du cratère.

Pour les plus grands cratères, dont le comblement a nécessité plusieurs milliers de mètres cubes de matériaux, des agrégats de corail ont été récupérées dans le remblai ayant servi à surélever le sol d'un ancien campement provisoire. Pour les plus petits cratères, la ligne de fond du lagon a été reconstituée par simple raclage des sédiments périphériques. L'opération de rebouchage de tous les puits était terminée fin juin 1996, peu de temps avant la cession des barges à leurs nouveaux propriétaires. Pour le traitement de l'ensemble des puits, plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes d'agrégats et environ dix mille tonnes de ciment ont été nécessaires.

VII.3.2 - ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES RADIOLOGIQUES FUTURES

À l'issue de la dernière campagne d'essais, la politique de transparence décidée par le Président de la République s'est traduite par la réalisation, à la demande du gouvernement français, d'études internationales sur l'évaluation des effets des essais sur l'environnement et les populations. L'AIEA a conduit une étude sur la situation radiologique actuelle et future des atolls de Mururoa et Fangataufa après 30 ans d'essais. Dans le même temps, une étude complémentaire sur la stabilité géologique et sur l'hydrogéologie de Mururoa et Fangataufa a été confiée à un groupe d'experts, l'*International geochemical commission*, réuni sous la responsabilité du Professeur Charles Fairhurst (Université du Minnesota, États-unis). Les deux études ont fait l'objet de rapports publiés en 1998. Le relâchement dans la biosphère des radionucléides initialement présents dans les cavités souterraines, par migration à travers les roches fissurées des formations géologiques des atolls, ou à travers le ciment d'obturation des puits d'essai, ainsi que la dispersion des radionucléides associés aux sédiments des lagons ont donc fait l'objet d'études approfondies par les scientifiques français et d'analyses par des experts internationaux.

L'évaluation des conditions radiologiques à long terme avait pour but d'estimer les doses hypothétiques auxquelles des groupes de personnes vivant dans la région du Pacifique Sud pourraient être exposés à la suite d'un éventuel relâchement dans l'océan environnant des radionucléides actuellement confinés dans le sous-sol de Mururoa et Fangataufa.

L'évaluation des conditions radiologiques futures du Pacifique Sud a nécessité de :

- déterminer à partir des énergies dégagées par les essais, l'activité résiduelle des radionucléides confinés dans les cavités-cheminées ;
- évaluer au cours du temps le taux maximum envisageable de relâchement des radionucléides directement dans l'océan ou *via* le lagon ;
- calculer la dispersion des radionucléides relâchés dans les eaux de l'océan Pacifique Sud et estimer l'évolution de leur niveau d'activité dans les eaux de mer au cours du temps ;
- calculer l'activité des radionucléides au sein des différentes composantes de l'environnement à partir de la dispersion des radionucléides relâchés dans les eaux du Pacifique Sud ;
- estimer les débits de dose au cours du temps auxquels seraient éventuellement exposés des groupes de population dits critiques potentiellement présents dans les lieux susceptibles d'être les plus exposés (Fig. 193).

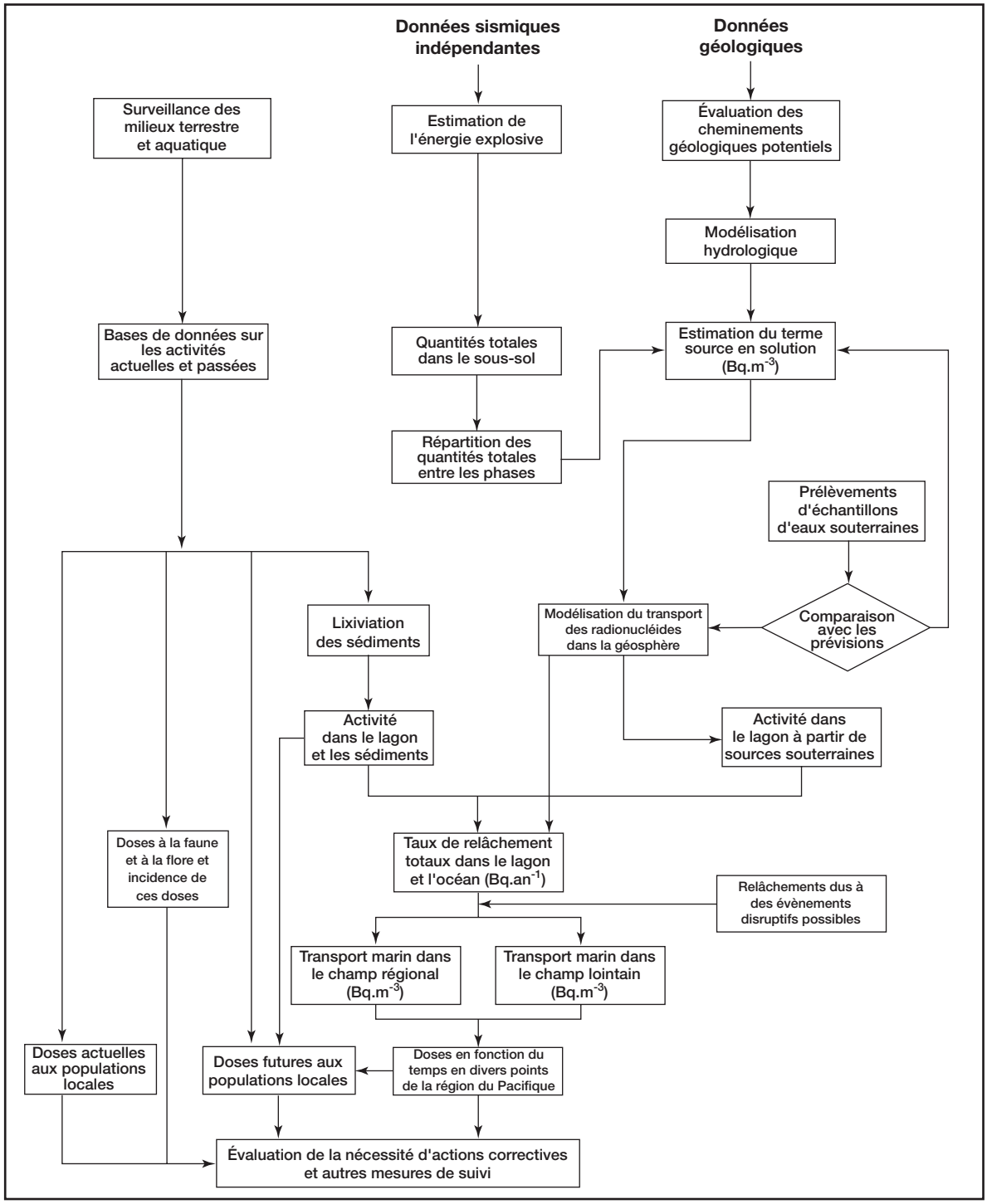


Fig. 193 - Diagramme des principales étapes nécessaires à l'évaluation des conditions radiologiques futures des populations à partir des relâchements de radionucléides des cavités d'essai et des sédiments des lagons.

Les résultats de l'évaluation obtenus par les scientifiques français ont fait l'objet d'une comparaison avec les résultats d'une étude menée par un groupe d'experts internationaux sous l'égide de l'AIEA qui a également vérifié les estimations des impacts radiologiques pour les sites d'expérimentations américains et russes. Les principales conclusions du rapport d'experts publié en 1998 par l'AIEA sont reprises dans les paragraphes suivants et le lecteur intéressé par le détail des calculs est renvoyé à ce document.

VII.3.2.1 - ÉVALUATION DE L'ACTIVITÉ RÉSIDUELLE CONFINÉE DANS LE SOUS-SOL

L'activité résiduelle des radionucléides subsistant après un essai souterrain dépend essentiellement de l'énergie explosive du dispositif nucléaire testé. Les évaluations d'énergie ont été utilisées pour estimer la quantité des principaux radionucléides associée à chaque essai (Tableau 75). Les estimations françaises concordent avec celles réalisées par les experts de l'AIEA. Il est intéressant de noter que les quantités totales des matières associées aux essais français représentent moins de 2% de la quantité totale de matières radioactives relâchées dans le cadre de l'ensemble des essais atmosphériques d'engins nucléaires effectués dans le monde. Ces informations ont été transmises à l'Andra qui en pérennise la mémoire et les comptabilise en tant que déchets radioactifs (Fig. 192).

Tableau 75.
Estimation des activités (TBq) des radionucléides confinés dans le sous-sol des atolls de Mururoa et de Fangataufa au 1er mai 1996.
Les données des estimations françaises sont comparées à celles publiées par les experts de l'AIEA.

Radionucléide	Étude AIEA			Total français[1]
	Mururoa	Fangataufa	Total	
^{3}H	232 000	48 000	280 000	280 000
^{14}C	25	2,6	28	nc[2]
^{36}Cl	1,3	0,4	1,7	nc
^{41}Ca	1,0	0,3	1,3	nc
^{55}Fe	3 800	3 800	7 600	nc
^{59}Ni	2,9	0,9	3,8	nc
^{60}Co	1 600	1 000	2 600	2 500
^{63}Ni	340	110	450	nc
^{79}Se	0,008	0,003	0,011	nc
^{85}Kr	670	380	1 000	700
^{90}Sr	7 300	3 500	10 800	11 000
^{93}Zr	0,23	0,09	0,32	0,35
^{99}Tc	1,9	0,6	2,5	2,8
^{106}Ru	3 900	3 400	7 300	20 000
^{107}Pd	0,18	0,03	0,21	nc
^{113m}Cd	2,7	0,6	3,3	nc
^{121m}Sn	0,32	0,03	0,35	nc
^{126}Sn	0,14	0,03	0,17	nc
^{125}Sb	420	310	730	700
^{129}I	0,0047	0,0014	0,0061	0,005
^{134}Cs	0,68	0,26	0,94	25
^{135}Cs	0,20	0,07	0,27	0,24
^{137}Cs	10 700	4 100	14 800	14 500
^{147}Pm	5 200	5 900	11 100	11 000
^{151}Sm	390	120	510	750
^{152}Eu	230	100	330	140
^{154}Eu	33	17	50	nc
^{155}Eu	330	140	470	1 200
^{236}U	0,12	0,02	0,14	nc
^{237}Np	0,22	0,03	0,25	0,25
^{238}Pu	185	15	200	200
^{239}Pu	1 030	70	1 100	1 100
^{240}Pu	280	20	300	300
^{241}Pu	6 200	620	6 820	6 800
^{242}Pu	0,0084	0,00085	0,0092	nc
^{241}Am	350	30	380	380

1 : Source Bureau de liaison français, document n° 4.
2 : nc : donnée non communiquée.

VII.3.2.2 - ÉVALUATION DES TAUX DE RELÂCHEMENT DES RADIONUCLÉIDES

À partir des activités résiduelles, le taux de relâchement des radionucléides initialement présents dans les cavités-cheminées dans les eaux du lagon et de l'océan a été estimé (terme source effectif). Connaissant les taux de lixiviation des radionucléides de la lave et les taux d'adsorption/désorption dans l'eau de la cavité-cheminée, les activités volumiques des radionucléides dans l'eau de l'ensemble des cavités-cheminées ont été calculées (terme source en solution). Les estimations de ces activités volumiques ont été validées par l'intermédiaire des résultats de mesure de la surveillance de la radioactivité des eaux des cavités-cheminées et ceux de l'étude de terrain de l'AIEA. Les taux de migration des radionucléides dissous dans l'eau des cavités à travers les roches volcaniques ont ensuite été estimés à partir de la circulation des eaux souterraines dans les formations géologiques des deux massifs. *In fine*, c'est le taux de relâchement total dans les roches carbonatées et, par voie de conséquence, dans les lagons et l'océan, en fonction du temps, de chacun des radionucléides pertinents pour les 149 essais, considérés comme autant de sources souterraines de résidus radioactifs, qui a été estimé. Il a été considéré que les radionucléides présents dans les formations carbonatées pouvaient être relâchés dans la biosphère, soit par remontée d'eaux souterraines depuis les lagons, soit par écoulement préférentiel dans les formations karstiques jusque dans l'océan à une profondeur de 300 à 400 m. Un modèle avec mélange, tenant compte de la présence d'eau dans les carbonates, a été utilisé pour décrire le taux de relâchement maximum envisageable au cours du temps des radionucléides dans les eaux du lagon et de l'océan (Fig. 194).

D'une manière générale, les résultats de la modélisation présentent une bonne concordance avec les quantités estimées à partir des mesures, comme cela sera montré dans le paragraphe suivant à partir des résultats de la surveillance radiologique des eaux souterraines.

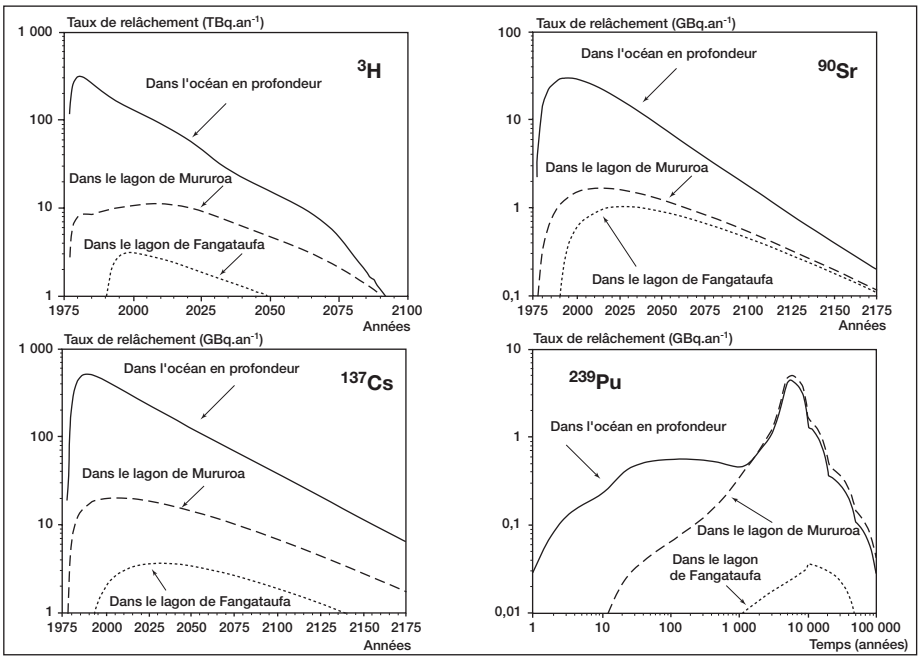


Fig. 194. - Prévisions de l'évolution annuelle des taux de relâchement en ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs et $^{239+240}Pu$ dans les eaux des lagons de Mururoa et Fangataufa et les eaux profondes de l'océan Pacifique proches des atolls.

Dans le cas d'une déstabilisation de flanc d'atoll, avec glissement des formations carbonatées, des quantités différentes de radionucléides seraient éventuellement relâchées. Ces hypothèses ont fait l'objet de calculs particuliers dont les résultats sont exposés dans la section de ce chapitre portant sur les scénarios disruptifs.

VII.3.2.3 - VALIDATION DU TERME SOURCE

Le transport des radionucléides dans la géosphère à partir des cavités-cheminées est un phénomène complexe en raison de l'hétérogénéité des formations géologiques et des nombreux processus physiques et chimiques qui interviennent entre les phases solubles et solides (cf. Chapitre I). Les éventuels relâchements de radionucléides ont fait l'objet de modélisations décrites dans le paragraphe précédent. Ainsi, il a été montré que le temps moyen de transit d'un traceur passif, de la base des carbonates jusqu'au lagon, est d'environ 800 ans, soit un temps assez long pour que ^{3}H, ^{90}Sr et ^{137}Cs éventuellement relâchés dans les carbonates aient disparu par décroissance radioactive.

Les mesures de terrain permettent de vérifier la validité des modèles utilisés. Aussi, une surveillance radiologique des eaux circulant dans les formations carbonatées a été mise en place à l'intérieur de différents secteurs d'expérimentations, sous les lagons de Mururoa et de Fangataufa et sous la couronne de Mururoa. Deux types de puits de surveillance ont été spécialement forés entre 1994 et 1996 à Mururoa, ceux terminant dans les cavités-cheminées et ceux se terminant dans les formations carbonatées ou volcaniques. Les résultats de mesure montrent que les activités volumiques en ^{3}H, ^{36}Cl et ^{129}I sont de trois à quatre ordres de grandeur plus faibles dans l'eau des puits de surveillance que dans les puits de cavité. Il en va en général de même pour le ^{90}Sr et ^{137}Cs, mais parfois l'écart est plus faible, en particulier pour les puits de surveillance situés dans le secteur Nord de Mururoa. Ces mesures permettent de suivre l'évolution annuelle des gradients de l'activité volumique des différents radionucléides au sein des carbonates des deux atolls (Fig. 195 et 196).

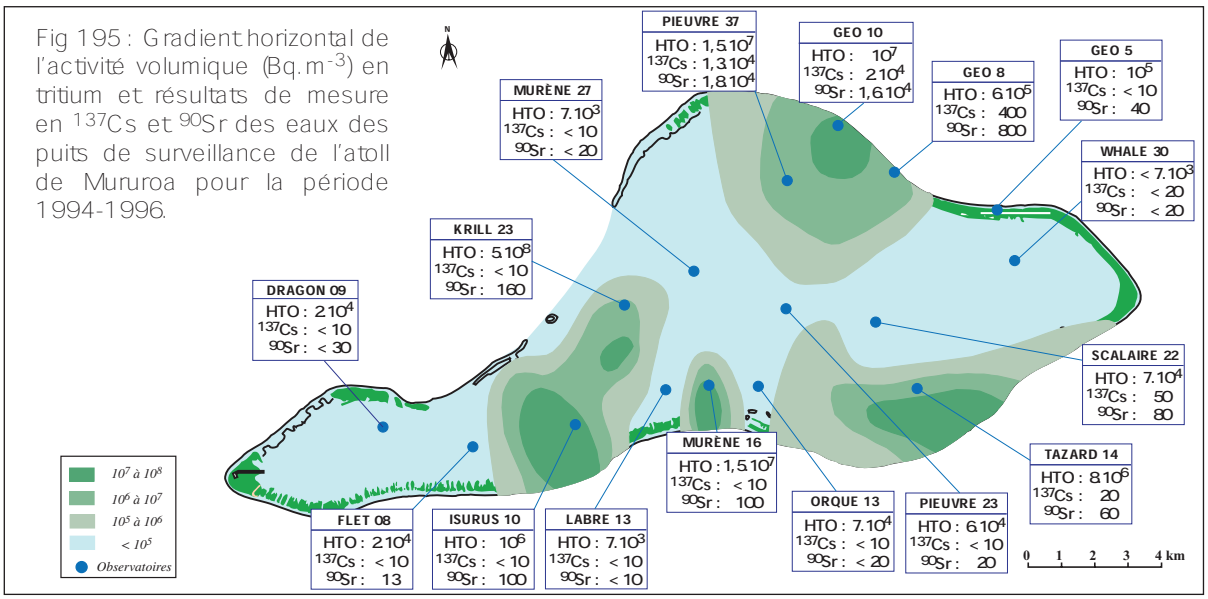


Fig 195 : Gradient horizontal de l'activité volumique (Bq.m^{-3}) en tritium et résultats de mesure en ^{137}Cs et ^{90}Sr des eaux des puits de surveillance de l'atoll de Mururoa pour la période 1994-1996.

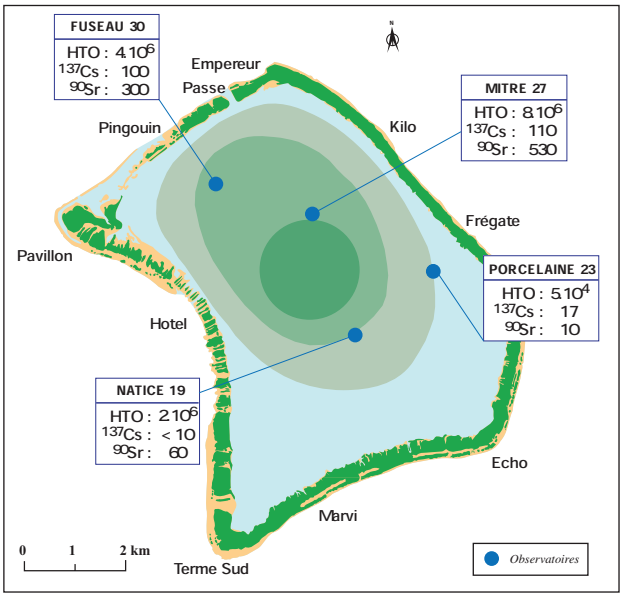


Fig 196 : Gradient horizontal de l'activité volumique (Bq.m^{-3}) en tritium et résultats de mesure en ^{137}Cs et ^{90}Sr des eaux des puits de surveillance de l'atoll de Fangataufa pour la période 1994-1996.

Les activités les plus élevées de l'atoll de Mururoa sont observées dans les secteurs où :

- des essais ont été réalisés dans les formations basaltiques mais dont les cheminées ont atteint le toit du volcanisme, essais dits à CATV (Fig. 197) ;
- des essais souterrains à énergie élevée ont été réalisés : essais Nestor et Enée sous la couronne et Mégarée sous le lagon et où la formation volcanique n'a pas suffisamment confiné les radionucléides.

À Fangataufa, le gradient d'activité dans les carbonates est dû à un essai unique (Lycos), de forte énergie, insuffisamment confiné dans les formations volcaniques.

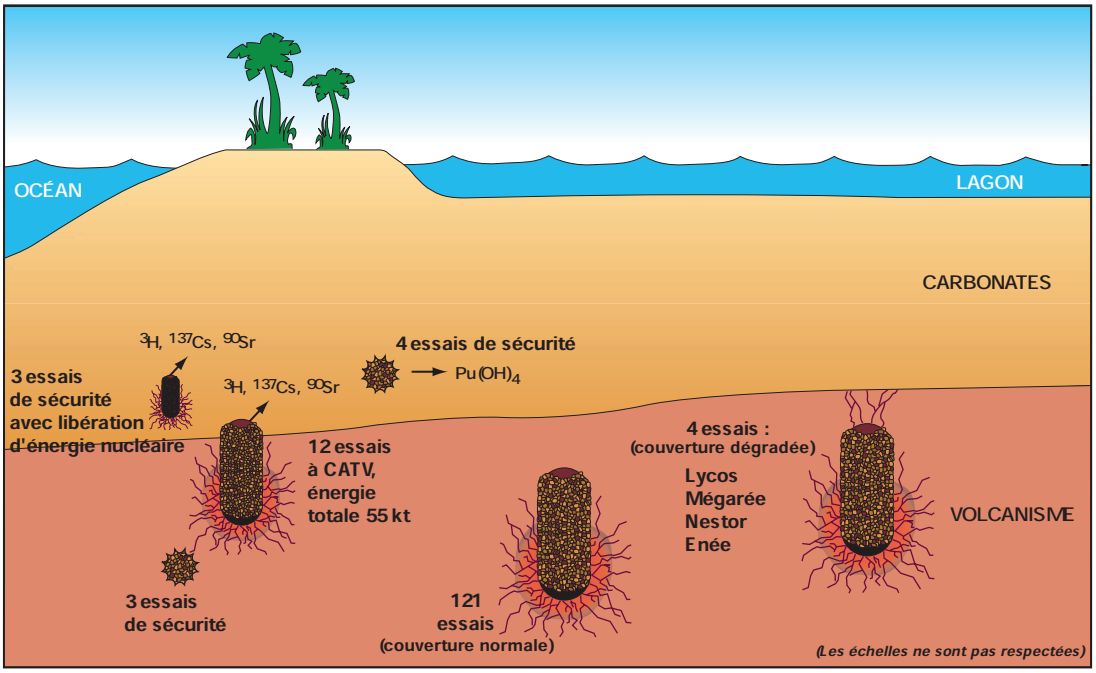


FIG. 197. - Schéma représentant les différents types d'expérimentations souterraines effectuées sur les atolls de Mururoa et de Fangataufa, avec leur nombre et leur impact sur la couverture géologique.

Les résultats de la surveillance de la radioactivité des eaux souterraines ont permis de valider l'estimation des activités déposées dans les zones particulières des carbonates et les taux de relâchement utilisés dans la modélisation des transferts potentiels des radionucléides dans les différentes composantes de la biosphère.

VII.3.2.4 - DISPERSION DES RADIONUCLÉIDES DANS LES EAUX DU PACIFIQUE SUD

La dispersion des radionucléides et l'évolution au cours du temps de leurs activités au sein des eaux de différentes régions du Pacifique Sud ont été calculées à partir de leurs taux de relâchement dans les eaux du lagon et de l'océan. Un premier modèle hydrodynamique a été utilisé pour calculer la dispersion des radionucléides au sein des eaux du lagon et quantifier leur transfert des eaux lagonaires vers l'océan. En complément, un modèle de transport sédimentaire a permis d'estimer les quantités annuelles de sédiments exportées par la passe vers l'océan. L'évolution de l'activité volumique des radionucléides dans les eaux océaniques a ensuite été calculée à l'aide de deux modèles océanographiques, l'un en champ régional et l'autre en champ lointain. Le modèle de dispersion en champ proche est un modèle à compartiments. Il compte 600 compartiments, et utilise une grille avec un maillage équidistant de 1° de longitude par 1° de latitude, soit environ 110 km par 110 km. Il est classiquement utilisé pour évaluer la dispersion en mer, à l'échelle régionale, des rejets liquides d'installations industrielles.

L'activité volumique du ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs et $^{239+240}Pu$ résultant du relâchement au cours du temps a été calculée. Les calculs ont couvert la période des 100 prochaines années pour ^{3}H, ^{137}Cs et ^{90}Sr et jusqu'à 100 000 ans pour ^{239}Pu. L'évolution au cours du temps de l'activité volumique du ^{3}H dans les eaux de surface près des îles habitées les plus proches des atolls d'expérimentations montre que la valeur maximale atteindrait 6 $Bq.m^{-3}$ vers l'année 8000 à Tureia (Fig. 198a). La valeur maximale en ^{137}Cs serait de 0,002 $Bq.m^{-3}$, une évolution similaire est observée pour le ^{90}Sr, avec une valeur maximale de 0,008 $Bq.m^{-3}$.

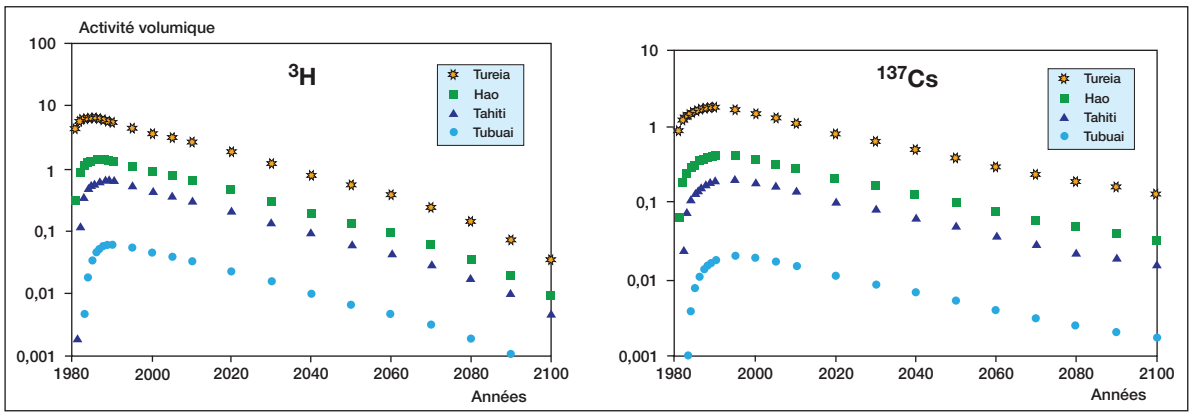


Fig. 198a. - Évaluation de l'évolution au cours du temps de l'activité volumique en ^{3}H ($Bq.m^{-3}$) et ^{137}Cs ($mBq.m^{-3}$) des eaux de surface à proximité des îles habitées de la Polynésie française.

La courbe du ^{239}Pu passe par deux valeurs maximales, 0,8 et 0,3 $mBq.m^{-3}$ à Tureia, reflétant respectivement la contribution du plutonium présent dans le sédiment des lagons et celle des éventuels relâchements futurs des cavités souterraines (Fig. 198b). Toutes les augmentations d'activité seraient inférieures aux niveaux caractéristiques du bruit de fond de l'océan Pacifique Sud.

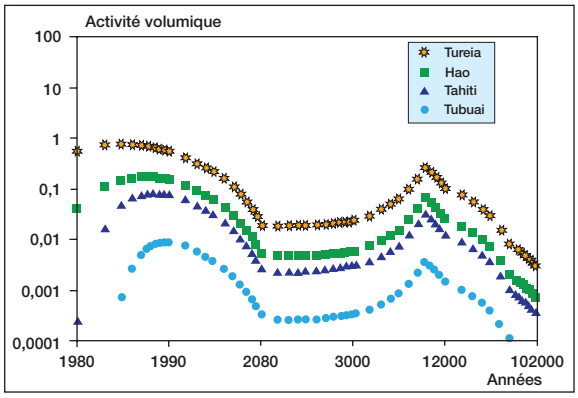


Fig. 198b. - Évaluation de l'évolution au cours du temps de l'activité volumique (mBq.m^{-3}) en $^{239+240}$Pu des eaux de surface, à proximité des îles habitées de la Polynésie française dans le cas d'un relâchement à partir des sédiments des lagons et des massifs géologiques.

Le calcul de la dispersion des radionucléides en champ lointain a été réalisé à l'aide d'un modèle eulérien de circulation de l'océan mondial, couplé à un modèle de dispersion de traceurs lagrangiens développés à l'Institut Max Planck pour la Météorologie de Hambourg afin d'étudier les changements climatiques.

Les variations au cours du temps, au sein du Pacifique Sud, de l'activité volumique des radionucléides ont été calculées pour les eaux de surface, supposées homogènes sur 50 m (relâchement à partir du lagon) et pour celles circulant à une profondeur de 400 m (relâchement karstique).

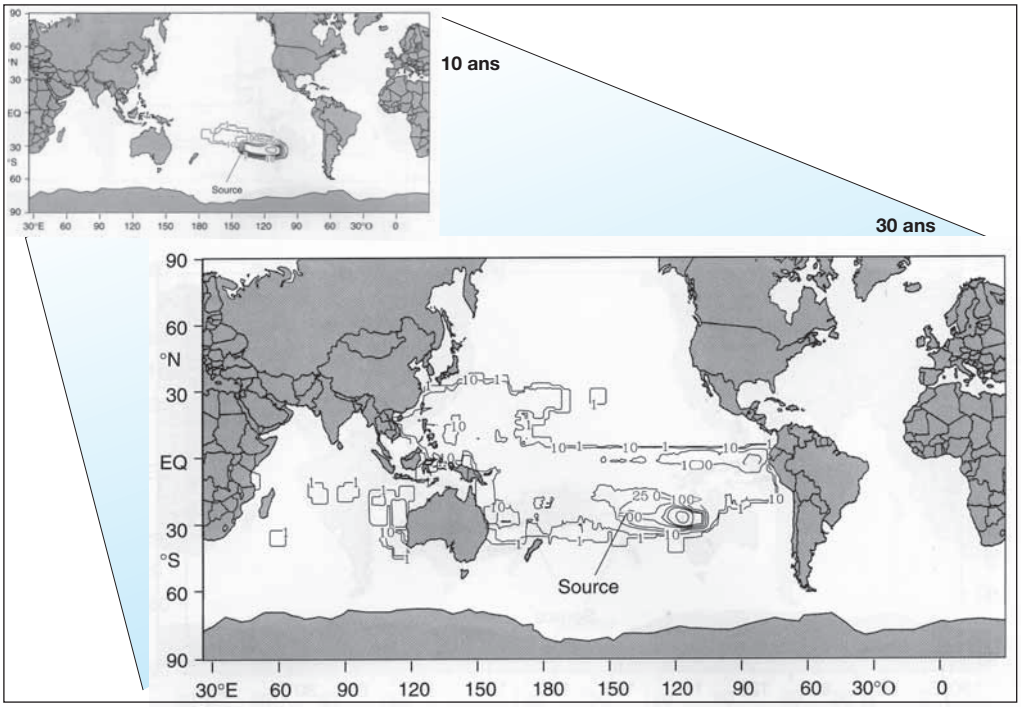


Fig. 199 - Activité volumique (10^{-7} Bq.m^{-3}) des eaux de surface de l'océan Pacifique Sud, 10 ans et 30 ans après le début des relâchements en plutonium. Ces valeurs peuvent être comparées à l'activité volumique actuelle en plutonium des eaux de surface du Pacifique Sud, de l'ordre de 1 à 4 mBq.m^{-3}.

Le plutonium, initialement issu des sédiments des lagons, est la source la plus importante de radioactivité. La modélisation de sa dispersion dans les eaux de surface a été réalisée après 5, 10, 30 et 50 ans, en considérant que le relâchement a débuté en 1996, avec un terme source estimé à 10 GBq.an^{-1} (Fig. 199). Cinq ans plus tard, la plume de dispersion de surface est cartographiée à l'est des atolls avec une activité volumique maximale à proximité des atolls de Mururoa et Fangataufa atteignant 0,2 mBq.m^{-3}. Après 10 ans, la plume s'est élargie, principalement en direction de l'Est. Après 30 ans, l'activité volumique maximale est de 0,2 mBq.m^{-3} à proximité de l'île de Pâques. Après 50 ans, l'activité volumique maximale des eaux de surface atteint 0,1 mBq.m^{-3} et apparaît négligeable pour toutes les autres régions du Pacifique Sud. Pour des temps plus importants, jusqu'à 1 000 ans, les activités volumiques décroissent progressivement suivant en cela la décroissance du terme source. Ces prévisions permettent de conclure que l'augmentation éventuelle la plus élevée restera inférieure d'un ordre de grandeur au bruit de fond océanique, aujourd'hui de 1 à 4 mBq.m^{-3}, résultat des retombées de l'ensemble des essais atmosphériques. L'activité volumique des autres radionucléides, ^{3}H, ^{137}Cs et $^{239+240}Pu$ dans les eaux de surface montre une décroissance rapide, à très courte distance des atolls d'expérimentations.

Pour les relâchements à 400 m de profondeur, la dispersion des radionucléides est orientée vers l'ouest. Après 10 ans, les activités volumiques à proximité des côtes australiennes, ayant subit une forte dilution, ne seraient pas décelables dans des niveaux du bruit de fond océanique.

VII.3.2.5 - ÉVALUATION DES DOSES

L'exposition aux rayonnements radioactifs des personnes vivant à proximité de Mururoa et Fangataufa résulte de deux sources : les sources naturelles et les résidus radioactifs déposés par les essais nucléaires atmosphériques. Les principales voies d'exposition sont :

- l'irradiation externe, par le rayonnement naturel cosmique ou tellurique ou due aux radionucléides d'origine artificielle présents dans les sols et les sédiments ;
- l'irradiation interne par inhalation de radionucléides lors de la remise en suspension de particules de sol ou de sédiments ;
- l'irradiation interne par l'ingestion de radionucléides dans la nourriture issue des atolls ou prélevée dans l'environnement marin.

La très faible contribution de l'exposition externe à la dose totale par les radionucléides primordiaux, isotopes des séries de l'uranium et du thorium, est due à leur faible niveau d'activité dans les sols des atolls essentiellement constitués de corail ou de débris de carbonate (cf. Chapitres IV et V).

La contribution la plus importante provient de l'ingestion de nourriture issue de cultures et d'élevages originaires des atolls ou de produits de la pêche locale. Pour ces derniers, l'évolution de l'activité des radionucléides au sein des différentes denrées d'origine marine du régime alimentaire des habitants de sites choisis du Pacifique Sud a été calculée à partir des activités volumiques des eaux océaniques.

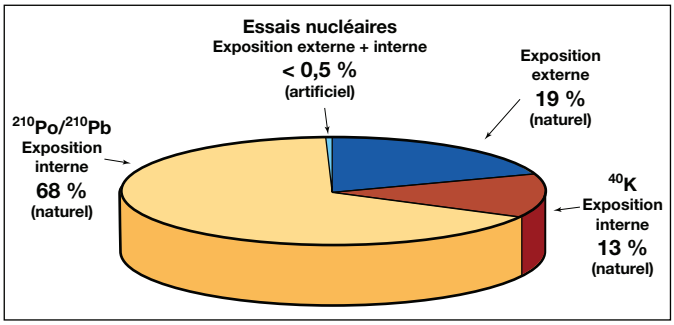


Fig. 200. - Proportion relative des doses résultant de l'exposition à des sources naturelles et aux résidus des essais nucléaires français.

Trois voies d'exposition complémentaires ont été également étudiées :

- l'incorporation de plutonium par des coupures et blessures ;
- l'ingestion de sol par les jeunes enfants ;
- l'exposition externe en fonction de la présence sur les plages et lors de la manipulation de matériel de pêche.

Outre les atolls de Polynésie actuellement habités, il a également été envisagé que les deux atolls d'expérimentations soient à terme peuplés et fassent l'objet de cultures et d'élevages. Pour ce scénario, le rapport des experts de l'AIEA montre que l'estimation de l'exposition d'une hypothétique population vivant sur les sites d'expérimentations conduit à une valeur faible en absolu puisque la valeur maximale reste de deux ordres de grandeur inférieurs à celle due aux rayonnements naturels (Tableau 76). De même, le calcul de l'exposition annuelle des habitants des autres îles du Pacifique résultant des éventuels relâchements de radionucléides de Mururoa et Fangataufa montre que pour Tureia, la dose annuelle maximale atteindrait 8 nanoSievert dans 5 000 ans. Les doses en d'autres lieux et d'autres temps seraient toutes plus faibles. Aux îles Cook et plus à l'ouest, les doses annuelles aux gros consommateurs de produits de la mer ne devraient pas dépasser 1 nanoSievert, que ce soit dans le présent ou à n'importe quel moment à l'avenir.

TABLEAU 76.
Dose annuelle (microSievert.an^{-1}) associée à la radioactivité résiduelle éventuellement relachée au cours du temps par les cavités-cheminées des atolls de Mururoa et Fangataufa.

	Doses annuelles, années à compter de 1995 (µSv.an^{-1})									
	1	20	50	100	200	500	1 000	2 000	5 000	10 000
Habitants de Mururoa (hypothétiques)	6	3	2	1	1	1	1	1	4	3
Gros consommateurs de produits de mer :										
• Tureia	0,03	0,01	0,004	0,004	0,001	0,001	0,001	0,002	0,008	0,005
• Tahiti	0,003	0,002	0,0005	0,0005	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,001	0,001
• Tubuai	0,0004	0,0002	0,00006	0,00005	0,00001	0,00001	0,00001	0,00003	0,00001	0,00007

VII.3.2.6 - SCÉNARII «DISRUPTIFS»

Cinq scénarii qualifiés de «disruptifs», c'est-à-dire susceptibles d'entraîner une accélération des relâchements de matières radioactives, ont également été examinés par les experts de l'AIEA. Ces scénarii liés à diverses hypothèses de changements climatiques ou géologiques sont brièvement présentés dans les paragraphes qui suivent.

Reprise de l'activité volcanique des atolls

La reprise de l'activité des volcans à l'origine des atolls pourrait faire remonter à la surface les matières radioactives présentes dans les formations volcaniques des atolls, sous forme de lave en fusion, de gaz et de vapeurs, pour être relâchées dans l'atmosphère, l'océan, le lagon et déposées sur le sol. Cependant, le point chaud magmatique à l'origine de la formation des atolls

de Mururoa et Fangataufa, il y a onze millions d'années, se déplace à raison de 11 centimètres par an, soit un kilomètre tous les mille ans (cf. Chapitre I). Ce point chaud est maintenant localisé à 70 kilomètres au sud-est des Pitcaim, îles britanniques situées à environ 1 000 kilomètres à l'est-sud-est de Mururoa. Compte tenu de leurs positions et du sens de la dérive de la plaque tectonique du Pacifique, les autres points chauds identifiés dans l'océan Pacifique Sud ne pourront se trouver dans le voisinage des atolls de Mururoa et Fangataufa avant un million d'années (Fig. 201).

Outre la faible probabilité que ce scénario se réalise, la reprise de l'activité volcanique ne pourrait donc se réaliser avant un million d'années, alors que l'activité de tous les radionucléides, y compris le ^{239}Pu, sera infinitésimale par le jeu de la décroissance radioactive.

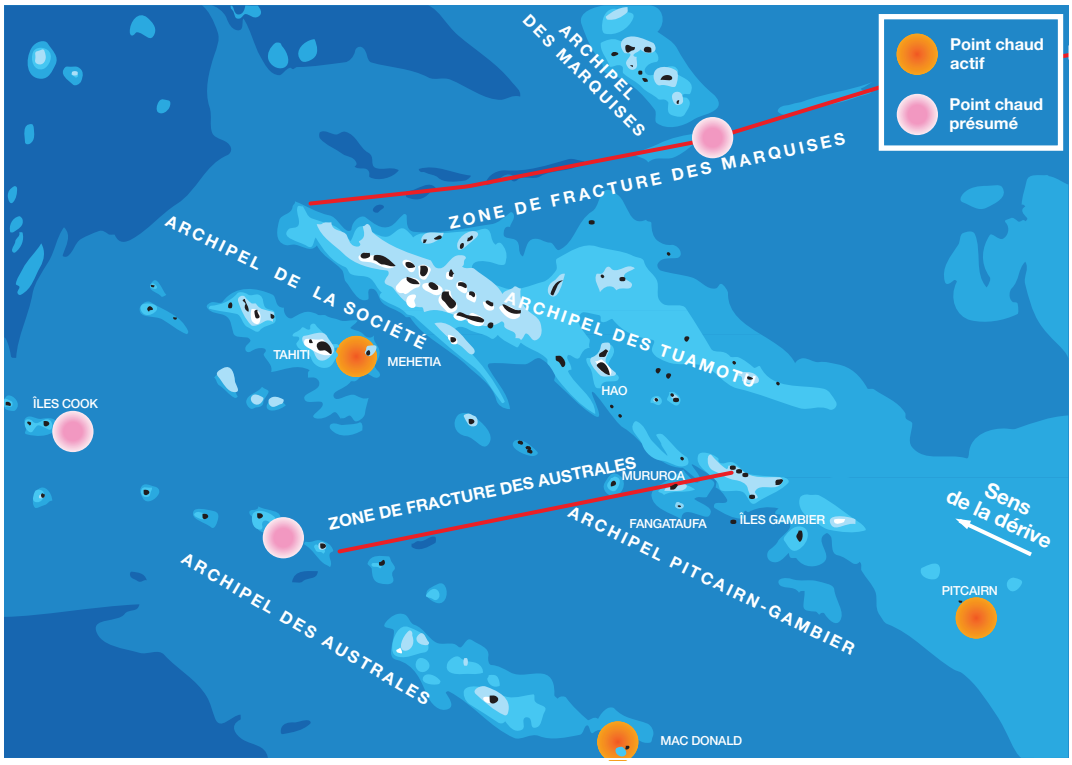


FIG. 201. - Points chauds magmatiques identifiés et présumés en Polynésie française.

Réchauffement de la planète

Le réchauffement de la planète, accompagné d'une remontée du niveau de l'océan, est considéré aujourd'hui comme un scénario probable et envisageable dans un délai de quelques dizaines d'années. Ce scénario fait l'hypothèse d'une submersion des atolls. Les études menées ont montré que cette submersion ne modifierait pas les hypothèses de relâchement des radionucléides piégés dans les cavités souterraines retenues pour le scénario de base (cf. section précédente), mais occasionnerait la dispersion dans l'océan des radionucléides, principalement le plutonium, présents initialement dans les sédiments du lagon. La cinétique du rejet et la capacité dispersive des radionucléides de l'océan sont telles qu'aucune augmentation de la dose de rayonnement aux habitants du Pacifique n'est attendue de ce scénario.

Apparition d'une période de glaciation

Ce scénario est basé sur l'apparition d'une période de glaciation entraînant une baisse du niveau des océans et, par conséquent, un assèchement des lagons et une augmentation sensible de la surface émergée des atolls. Les atolls de Mururoa et Fangataufa ont connu, depuis leur formation, plusieurs périodes glaciaires ayant entraîné des baisses du niveau des eaux supérieures à 100 mètres. La prochaine grande glaciation ne devrait pas survenir avant au moins 50 000 ans. Les radionucléides présents dans les sédiments et les cavités auront alors disparu par décroissance radioactive, à l'exception du ^{239}Pu, dont l'activité aura été divisée par 4.

Afin d'explorer toutes les conséquences potentielles de l'apparition d'une telle période de glaciation, une hypothèse complémentaire, certes hautement improbable en raison de la situation isolée de l'atoll et de son caractère relativement peu propice à l'agriculture, a été considérée : celle d'un peuplement sédentaire. Les conséquences d'une période glaciaire dans 50 000 ans ont donc été estimées sur la base d'une baisse de 100 mètres du niveau des océans, ce qui amènerait à une exondation des sédiments du lagon, à la présence d'une population sédentaire sur l'atoll et à la mise en culture des zones sédimentaires découvertes. Outre ces hypothèses, il a été supposé que la baisse de l'activité du plutonium présent dans les sédiments n'était due qu'à la décroissance radioactive, en faisant abstraction des processus possibles de lixiviation et de désorption pendant la période liminaire.

Le bouleversement de l'environnement des atolls de Mururoa et de Fangataufa aurait différentes conséquences en termes d'exposition des populations. Les radionucléides présents dans les sédiments des lagons pourraient être remis en suspension, en particulier par les travaux agricoles, et devenir inhalables. La mise en culture des zones sédimentaires asséchées du lagon entraînerait une production de produits agricoles présentant des traces de radioactivité d'origine artificielle. De plus, l'utilisation possible des eaux souterraines constituerait une troisième voie d'exposition interne directe pour les habitants et indirectes par l'aspersion des cultures.

L'inventaire du ^{239}Pu présent dans les sédiments amène à une masse de 1,3 kg dans 50 000 ans, soit une activité de 3 TBq. Ces sédiments exondés, avec des hypothèses d'empoussièrement standard, entraînerait pour les populations une dose efficace annuelle de 0,6 µSv par inhalation.

L'activité du ^{239}Pu présent dans les carbonates de Mururoa est estimée à 50 TBq, 30 TBq provenant des essais souterrains et 20 TBq provenant des essais de sécurité. Compte tenu d'un volume d'eau douce présent dans les carbonates estimé à 6 milliards de m^3 et, de la proportion du plutonium mis en solution (0,04%), l'activité du ^{239}Pu dans l'eau serait de l'ordre de 3.10^{-3} Bq.l^{-1}. La part du plutonium mise en solution est calculée à partir du coefficient de distribution du plutonium (500 l.kg^{-1}), de la masse volumique des carbonates (2 200 kg.m^{-3}) et de leur porosité (0,3). La consommation de cette eau comme eau de boisson, sur la base de 2 l.j^{-1}, conduirait à une dose efficace annuelle de 0,5 µSv pour les populations polynésiennes.

Compte tenu des faibles facteurs de transfert entre le sol et les plantes pour le plutonium et du faible niveau de l'activité massique des sédiments (5 Bq.kg^{-1} en moyenne), la consommation de denrées produites sur les atolls induirait des doses inférieures de plusieurs ordres de grandeur à celles résultant de l'inhalation de poussières ou de la consommation d'eau issue du sous-sol.

En conclusion, une période de grande glaciation se produisant dans un délai de 50 000 ans induirait des doses efficaces annuelles inférieures à 11 µSv.an^{-1} pour les personnes susceptible de vivre en autoconsommation sur les atolls.

Intrusion humaine

Les scénarii d'intrusion humaine sont basés sur des hypothèses de forages, dans ou à proximité, d'une cavité résultant d'un essai. Il a été supposé que ces forages pourraient être effectués dans le cadre de la prospection de ressources naturelles ou d'extraction d'eau. Les risques encourus par de telles pratiques concerneraient :

- les personnes effectuant ces forages qui pourraient être en contact direct avec les radio nucléides ;
- l'environnement et la population de l'atoll, dans la mesure où l'étanchéité des cavités serait rompue, en particulier si les forages restaient ouverts ou étaient mal rebouchés.

Une intrusion humaine qui aurait des conséquences radiologiques clairement dommageables pour les intrus est considérée comme hautement improbable compte tenu de l'absence de ressources naturelles dans le sous-sol des atolls et de la profondeur des eaux susceptibles d'être contaminées par les radionucléides.

Risques naturels majeurs : glissements de roches carbonatées

Une catastrophe naturelle majeure, comme un cyclone, un tsunami, une tempête ou encore un séisme, pourrait avoir pour conséquence de déclencher un glissement de roches carbonatées :

- soit directement, en augmentant la fracturation des atolls (séisme) ;
- soit indirectement, à la suite des dommages causés en surface (cyclone, tsunami, tempête).

Un relâchement des matières nucléaires ne pourrait se produire que si le glissement de roches des formations géologiques de surface mettait à nu des zones où étaient confinés les radionucléides. Comme la plus grande partie des matières radioactives se trouve dans la zone volcanique, un glissement au niveau de la zone carbonatée n'exposerait qu'une fraction minime des radionucléides présents dans le sous-sol (Fig. 202).

Un glissement hypothétique de roches coralliennes et carbonatées a été imaginé dans le secteur Nord de l'atoll de Mururoa, où ont été effectués 7 essais pour lesquels la cheminée a pénétré la zone carbonatée et plusieurs essais de sécurité souterrains. Dans ce scénario, il est supposé que la totalité du plutonium provenant d'un essai de sécurité, soit 10 TBq, et les radio nucléides résultant de l'essai d'un engin de 5 kt (1 000 TBq de ^{3}H, 10 TBq de ^{90}Sr et 30 TBq de ^{137}Cs) seraient instantanément relâchés dans l'océan, à une profondeur de 400 mètres. Il s'agit d'un scénario extrêmement pessimiste et pénalisant. L'hypothèse que les radionucléides, y compris le plutonium, principal contributeur à la dose, entreraient en totalité en solution, ce qui est improbable, a été également retenue.

Les activités volumiques maximales de l'eau de mer et des produits de la pêche seraient mesurées à Tureia quelques mois après l'éboulement. Pour des consommateurs de produits de la pêche, la dose efficace maximale est estimée à environ 7 $\mu Sv.an^{-1}$, la première année à Tureia et de 3 $\mu Sv.an^{-1}$ l'année suivante (Tableau 77). Il s'agit là de doses très faibles et néanmoins surestimées compte tenu du caractère pessimiste des hypothèses retenues dans ce scénario.

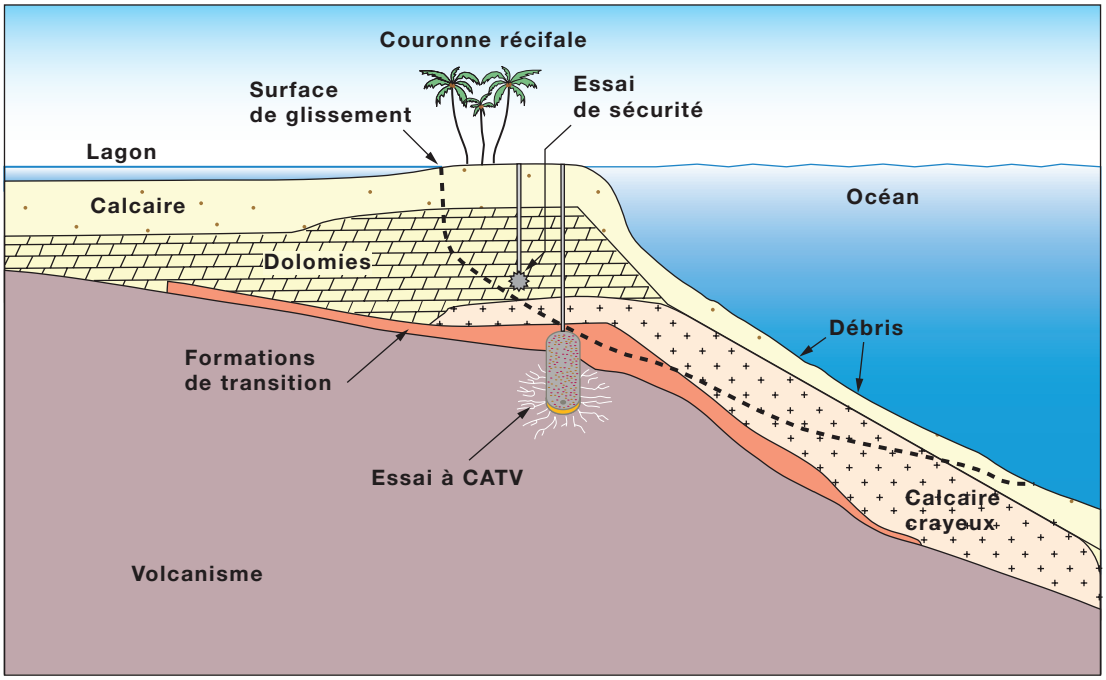


FIG. 202. - Glissement hypothétique de roches carbonatées entraînant un relâchement de matières radioactives contenues initialement dans une cavité-cheminée.

TABLEAU 77.
Les doses ($\mu Sv.an^{-1}$) auxquelles seraient exposées les populations de Tureia, Hao et Tahiti grandes consommatrices de produits de la mer sont indiquées entre 1 et 20 ans après le relâchement de matières radioactives dans l'océan.

Îles	Nombre d'années après l'évènement					
	1	2	3	5	10	20
Tureia	**6,6**	**2,8**	**1,2**	**0,42**	**0,09**	**0,004**
Hao	**0,39**	**0,93**	**0,53**	**0,25**	**0,08**	**0,003**
Tahiti	**0,006**	**0,21**	**0,41**	**0,18**	**0,04**	**0,002**

VII.4 - SURVEILLANCE ACTUELLE DES ATOLLS

Le 25 septembre 1995, la Conférence générale de l'AIEA votait une résolution demandant à tous les états concernés «*de s'acquitter de leurs responsabilités en veillant à ce que les sites où des essais nucléaires ont été effectués fassent l'objet d'une surveillance scrupuleuse et en prenant des mesures appropriées pour éviter des impacts néfastes sur la santé, la sûreté et l'environnement imputables à ces essais nucléaires*». C'est dans cette perspective qu'à l'arrêt des essais, en 1996, le programme de surveillance géomécanique et radiologique des anciens sites d'expérimentations a été adapté à la nouvelle situation opérationnelle des sites. En effet, bien que l'expertise de l'AIEA de 1998 ait conclu «*qu'il n'est pas nécessaire de poursuivre la surveillance de l'environnement de Mururoa à des fins de protection radiologique*», depuis cette date, la caractérisation régulière de l'état radiologique et géomécanique des atolls de Mururoa et de Fangataufa, a été orientée pour vérifier les résultats de l'évaluation prévisionnelle de l'impact des essais nucléaires sur l'environnement. Cette surveillance est aujourd'hui sous la responsabilité du Département de suivi des centres d'expérimentations nucléaires (DSCEN) de la Délégation générale pour l'armement (arrêté du 25 août 2000). Cet organisme est composé de personnels du ministère de la Défense et du CEA.

Les sites d'expérimentations du Pacifique font l'objet de l'article 24 du décret n° 2001-592 du 5 juillet 2001 confiant les modalités de la surveillance au ministre de la Défense *via* l'autorité de sûreté : le Délégué à la sûreté nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la défense (DSND). Dans ce domaine, ce dernier s'appuie sur les avis émis par la Commission de sûreté pour la surveillance des anciens sites d'expérimentations (C3S).

Sur le plan juridique, la tutelle des sites de Mururoa et de Fangataufa est exercée par le ministère de la Défense. Par l'arrêté du 5 juillet 2001 précité, ces sites ont le statut d'Installation nucléaire intéressant la Défense (INID). Ce sont donc des terrains militaires placés sous la responsabilité territoriale du Commandant supérieur des forces armées en Polynésie française (Comsup - PF). Ainsi, la surveillance, la protection et le contrôle des accès sont assurés de façon permanente à Mururoa, par une section composée de personnel mis en place par le Régiment d'infanterie de marine du Pacifique (Rima-P). Fangataufa fait l'objet d'une surveillance occasionnelle par des survols aériens ou des inspections du site par du personnel héliporté.

Les paragraphes suivant détaille le programme de surveillance géomécanique et radiologique des atolls d'expérimentations toujours en cours en 2006.

VII.4.1 - SURVEILLANCE GÉOMÉCANIQUE DE MURUROA

Les atolls possèdent naturellement des zones de faiblesse mécanique. Les principales d'entre elles sont localisées :

- soit au niveau des ruptures de pente de la falaise récifale ;
- soit au droit de larges vallées sédimentaires sous-marines, grossièrement perpendiculaires au flanc des atolls, contenant des accumulations importantes de matériaux détritiques (résidus de roches érodées), poreux et peu cohérents, et présentant une faible tenue mécanique.

Des arrachements au niveau de la falaise corallienne et des avalanches sous-marines se sont produits par le passé sous l'effet des explosions souterraines réalisées sur l'atoll de Mururoa. Ces phénomènes sont liés à une fracturation produite par le passage de l'onde de choc d'un essai nucléaire souterrain, suivie d'une déstabilisation des blocs sous l'effet de la gravité,

cette déstabilisation étant éventuellement favorisée par certaines conditions météorologiques (houles et tempêtes).

L'ensemble des zones dans lesquelles des arrachements de la falaise récifale ou des effondrements sous-marins sont susceptibles de se reproduire ont été identifiées. Par le passé, ces phénomènes ont été limités à la côte Sud-Ouest de l'atoll de Mururoa. Cependant, malgré l'arrêt des essais, des phénomènes de ce type, bien que de moindre amplitude, sont susceptibles de se produire encore, notamment dans les secteurs Sud-Ouest et Nord-Est de Mururoa (Fig. 203).

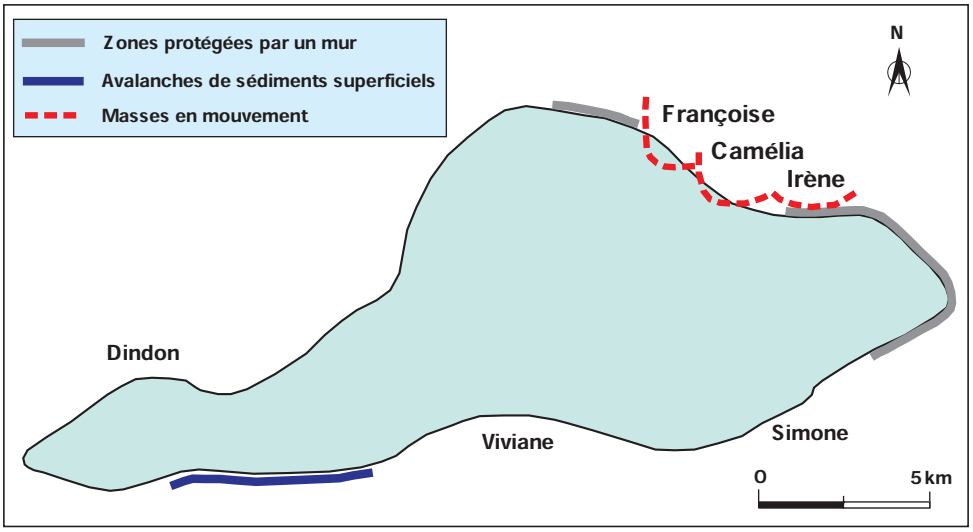


FIG. 203. - Carte de l'atoll de Mururoa avec la position des masses carbonatées montrant la fracturation la plus importante en surface.

L'effondrement soudain de pans de falaises ou l'éboulement de masses sédimentaires sous-marines pourraient générer des vagues susceptibles de submerger le platier, jusqu'à plusieurs kilomètres de l'épicentre. La hauteur de ces vagues, au droit de l'épicentre, pourrait être de plusieurs mètres, si bien qu'elles présenteraient un danger pour les personnes présentes dans le secteur temporairement submergé. Dans ce cas de figure, les personnes présentes en dehors du secteur Est de l'atoll de Mururoa (zone Martine) protégé par des murs devraient se réfugier sur les points hauts (plates-formes, bunker) ou se diriger vers le centre du lagon (en absence de point haut proche). Le personnel présent dans le secteur abrité par les murs ne courrait aucun risque.

En conséquence, tant que des personnes seront amenées à résider sur l'atoll de Mururoa (pour des raisons de gardiennage) et tant que la situation géologique ne sera pas stabilisée, il a été décidé :

- de suivre très strictement les accès aux zones non protégées par les murs, qui devront être aussi limités dans le temps que possible ;
- de conserver des murs de protection permettant de maintenir à l'abri la zone Martine où réside le personnel en charge du gardiennage du site et de maintenir des plates-formes de refuge sur zones, principalement à proximité des stations de mesure ;
- de conserver un système de surveillance et d'alerte capable à la fois d'avertir automatiquement et en temps réel les personnes, notamment celles présentes sur zone, lorsqu'un risque imminent de vague (de faible ampleur) est diagnostiqué, et capable de vérifier que l'évolution des zones en mouvement reste conforme à celle qui a été prévue et, éventuellement, de mettre en évidence toute accélération anormale qui serait le signe d'une déstabilisation à venir.

Ces éléments, déjà mis en œuvre à partir du début des années 1980, ont été maintenus, sous une forme adaptée et suffisante, jusqu'à nos jours.

VII.4.1.1 - OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE GÉOMÉCANIQUE

La surveillance avait initialement été définie de façon à ce que, de concert avec l'observation de règles très strictes quant aux moyens et aux modalités d'accès sur zones lors des essais, la sécurité du personnel vis-à-vis des risques hydrauliques soit à tout moment assurée.

À l'arrêt des activités du CEP, la surveillance a été adaptée à cette nouvelle situation et comprend deux volets : le suivi continu d'indicateurs représentatifs de l'évolution du massif géologique de l'atoll et la réalisation périodique de campagnes complémentaires d'observation de la géosphère (topographie), offrant une vue plus globale de l'évolution de Mururoa et un état de celle de Fangataufa. Le suivi continu concerne uniquement l'atoll de Mururoa où les effets des essais sur le massif ont été les plus importants. Il se justifie par la nécessité de connaître en temps quasi réel toute évolution pouvant mettre en jeu la sécurité des personnes se trouvant sur l'atoll. L'atoll de Fangataufa qui est inhabité et où aucun mouvement majeur n'a été mis en évidence, ne nécessite pas le maintien d'une telle surveillance.

Les effets géomécaniques des essais, les risques et le dispositif de surveillance exposés ci-après sont décrits dans les publications associées aux expertises internationales de l'AIEA ou de la Commission géomécanique Internationale. Ce suivi repose sur le système baptisé Telsite (Télésurveillance du site). Ce système, entièrement automatique, transmet ses résultats de mesures et diagnostics en Métropole, par liaisons satellite, et ne nécessite, par conséquent, aucun personnel spécifique sur place.

VII.4.1.2 - SUIVI CONTINU DE L'ÉVOLUTION DE MURUROA

La télésurveillance repose sur des capteurs connectés à des stations d'acquisition de données, réparties sur le pourtour de la couronne de l'atoll de Mururoa et reliées par des transmissions hertziennes numériques à une station centrale.

L'alerte à 90 secondes repose sur la détection en temps réel d'événements sismiques à l'aide de différents équipements :

- deux stations sismiques de surface équipées de sismomètres, situées en zones Dindon et Viviane, susceptibles de détecter et de localiser les éboulements sur les flancs de l'atoll ;
- quatre stations sismiques en puits, (jusqu'à 450 m de profondeur) équipées de géophones triaxiaux, situées aux points PK5N, PK8N, PK10N et PK8S, détectant et localisant les relâchements de contrainte locaux et les éboulements sur les flancs.

Le suivi continu de l'évolution géologique du secteur Nord de Mururoa repose sur l'observation spatiale et temporelle de la sismicité enregistrée par le réseau décrit ci-dessus et sur la mesure régulière des déformations en profondeur, par des capteurs dits séquentiels en place dans les secteurs les plus sensibles (Fig. 204) :

- un puits (GEO8B) équipé de 5 paires d'inclinomètres scellés dans le terrain entre 350 et 450 m de profondeur. Ces appareils détectent les variations d'inclinaison des couches avec une précision supérieure au millidegré.

- six forages inclinés à 30°, 40° ou 45° latéraux (FIL) de plusieurs centaines de mètres de longueur, munis de câbles ancrés à leur extrémité et équipés chacun de 2 capteurs d'élongation de dynamiques différentes. Ils permettent, avec une précision supérieure au millimètre, de suivre le mouvement des différents compartiments du glissement délimités par les failles subverticales. Ces types de forage sont situés au PK5 (zone Irène), au PK8 (centre de la zone Camélia) et au PK10 (zone Edith-Françoise).
- quatre balises GPS de géodésie spatiale toutes situées en secteur Nord de Mururoa : au PK5N (digue Hôtel), PK7N (digue Charlie, point dénommé GPS1), PK10N (digue Kilo) et sur un pilier situé en zone Jeanne (référence). Elles fournissent automatiquement le mouvement relatif des différentes parties instables dans les trois directions, par rapport à la référence stable située en Jeanne. La précision de ces mesures automatiques est de 10^{-6}, les balises sont donc capables de détecter un déplacement de 1 mm sur une base de mesure de 1 km.

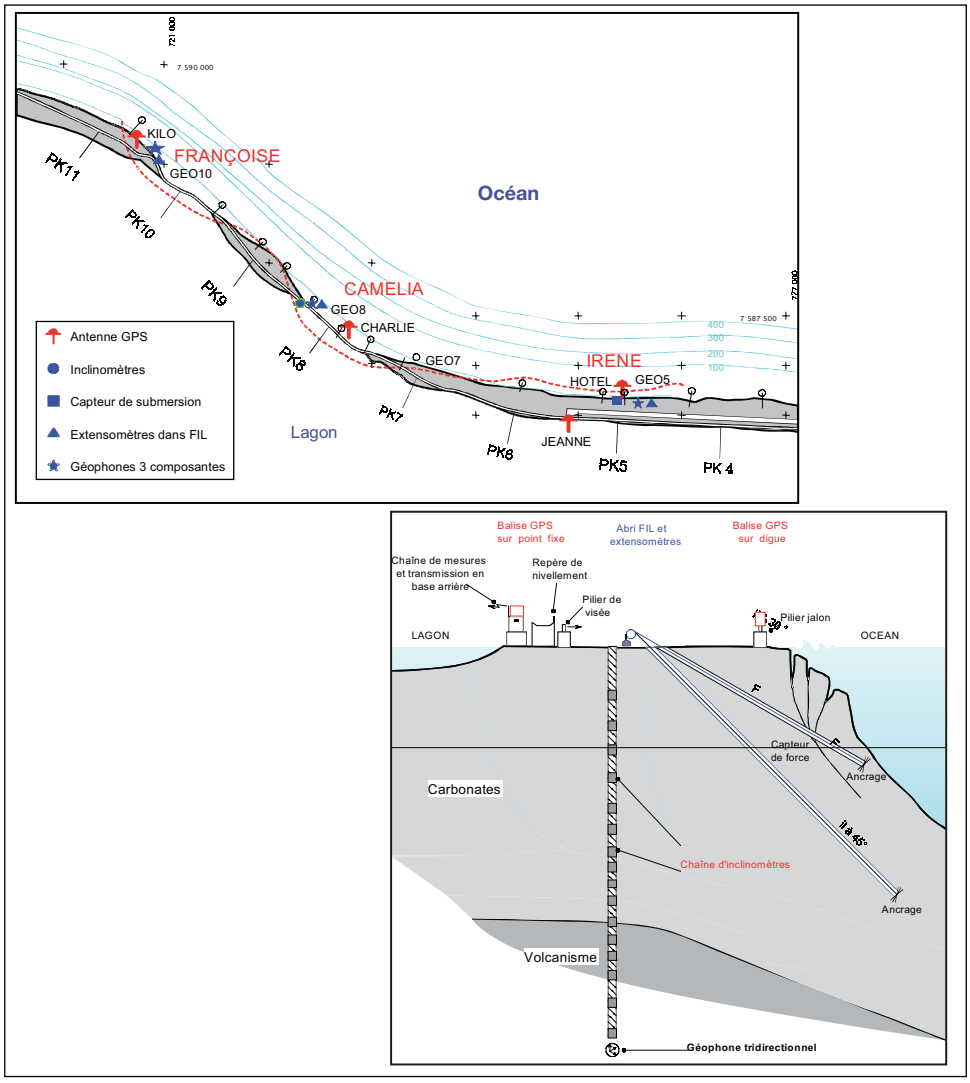


FIG. 204. - Localisation précise de l'instrumentation de surveillance géomécanique en secteur Nord. Vue en coupe des principales composantes de cette instrumentation.

Cette instrumentation est complétée par trois capteurs de submersion (capteurs de pression) qui permettraient, en cas d'éboulement suivi de l'arrivée d'une vague sur le platier, de mesurer l'amplitude des phénomènes hydrauliques et de les comparer aux prévisions effectuées pour dimensionner les protections.

VII.4.1.3 - SUIVI PÉRIODIQUE DE L'ÉVOLUTION GÉOMÉCANIQUE GLOBALE DES ATOLLS

Un suivi complémentaire global des atolls est réalisé lors de campagnes d'observation spécifiques. Ces campagnes, organisées à intervalles réguliers, de l'ordre de 5 ans, concernent essentiellement l'observation de l'évolution de la partie haute des flancs des atolls, assurée principalement par :

- un suivi des éventuels tassements et mouvement horizontaux locaux, particulièrement en secteurs Nord-Est et Sud-Est de Mururoa, par l'intermédiaire de campagnes de topographie par levé GPS ;
- un suivi de la fracturation de surface par des campagnes de photographies aériennes de la couronne et particulièrement du secteur Nord, avec des prises de vue à basse altitude (1 000 à 1 500 pieds) permettant ensuite de cartographier les fractures sur les photographies.

Si cela s'avérait nécessaire, ces observations peuvent être complétées par :

- un suivi des déformations de surface (fracturation et tassements différentiels) par des mesures de radar SAR opérées depuis un avion ou un hélicoptère ;
- un suivi de la géomorphologie des flancs et de la fracturation sous-marine, par des mesures bathymétriques et d'imagerie acoustique, des fonds superficiels, de 10 à 300 m de profondeur, par des campagnes de sonar latéral et bathymétriques le long de profils respectivement parallèles et perpendiculaires à la côte, mises en œuvre depuis un bateau.

VII.4.2 - SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DES ATOLLS

L'expertise radiologique réalisée à Mururoa et Fangataufa en 1996 par l'AIEA constitue la situation de référence des niveaux d'activité dans l'environnement des atolls d'expérimentations. L'étude publiée en 1998 par l'AIEA sur les sites d'expérimentations a conclu «*qu'il n'est pas nécessaire de poursuivre la surveillance de l'environnement de Mururoa et Fangataufa à des fins de protection radiologique*». Elle indique toutefois «*qu'une certaine surveillance des niveaux des radionucléides dans la biosphère, pourra également être utile pour convaincre le public de la sûreté radiologique permanente des atolls*». Cette démarche a été retenue par la France qui a décidé de continuer à surveiller la radioactivité dans l'environnement des sites. Les modalités pratiques de la surveillance radiologique ont été validées par la mission d'étude de l'AIEA.

L'activité résiduelle d'origine artificielle, encore décelable dans les composantes naturelles des atolls a pour origine, d'une part, en surface dans la biosphère, les retombées des essais atmosphériques et, d'autre part, au sein des massifs géologiques, les résidus des essais souterrains. La surveillance radiologique de l'environnement des atolls de Mururoa et Fangataufa a donc pour objectifs de vérifier :

- l'absence d'augmentation anormale de l'activité des radionucléides au sein des différentes composantes de la biosphère ;
- la conformité des prévisions de l'évolution de l'activité des radionucléides migrant dans la géosphère, à partir des systèmes cavités-cheminées débouchant à la base des formations carbonatées des atolls.

À cette fin, une surveillance très complète des différents compartiments du milieu naturel des atolls d'expérimentations est effectuée avec une fréquence de prélèvements ajustée à la très faible variabilité au cours du temps de l'activité résiduelle des radionucléides encore présents dans l'environnement.

Les résultats de mesures obtenus durant la dernière décennie indiquent que la fréquence optimale de prélèvement se situe entre trois et quatre ans pour la réalisation d'un point complet des différents compartiments de l'environnement. Les modalités du programme annuel actuel vont bien au-delà de cette fréquence optimale d'échantillonnage.

La surveillance radiologique des différentes composantes naturelles des atolls est complétée par celle des produits alimentaires consommés en Polynésie française. Cette dernière est aujourd'hui réalisée par l'IRSN qui détaille dans un rapport de surveillance annuelle transmis à l'*Unscear*, les modalités de prélèvement d'échantillons et les résultats de radioactivité obtenus (cf. Chapitre V). Le lecteur est invité à consulter ces rapports sur le site internet de cet institut.

VII.4.2.1 - MODALITÉS DE SURVEILLANCE

La surveillance radiologique des atolls de Mururoa et Fangataufa concerne les compartiments atmosphériques, terrestre et marin. Les eaux souterraines circulant au sein des formations carbonatées font également l'objet d'une surveillance radiologique particulière.

La surveillance radiologique est composée de deux volets :

- un suivi en continu des aérosols atmosphériques et de la dose intégrée ;
- des campagnes annuelles de prélèvement d'échantillons des autres composantes de l'environnement pour mesure en laboratoire.

Les modalités de prélèvement et de mesurage des échantillons sont brièvement rappelées dans les paragraphes suivants. Le lecteur souhaitant connaître les détails des protocoles utilisés peut se reporter au chapitre III.

Nature et fréquence des prélèvements

La surveillance radiologique en continu des sites est assurée par :

- la collecte des aérosols atmosphériques par aspiration d'air au travers d'un filtre. Les filtres, changés quotidiennement, sont adressés mensuellement en métropole pour analyses ;
- la mesure de la dose intégrée (dosimétrie d'ambiance) à l'aide de dosimètres changés trimestriellement.

En complément, des échantillons des milieux physique et biologique sont prélevés au cours d'une campagne de prélèvements appelée Turbo organisée entre mars et juin de chaque année (Tableau 78). Les différents échantillons prélevés sont conditionnés (congelés, séchés, filtrés, acidifiés) sur place, avant de faire l'objet d'un traitement spécifique en métropole par le laboratoire en charge de la mesure.

Les prélèvements sont réalisés sur les deux sites de Mururoa et Fangataufa par le personnel basé en métropole du DSCEN et de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA. Le soutien logistique nécessaire au déroulement de la surveillance est assuré par des unités du Comsup–PF.

TABLEAU 78.
Caractéristiques des prélèvements et des échantillons réalisés dans le cadre de la campagne annuelle Turbo.

Nature de l'appareillage ou des échantillons prélevés	Poids - Volume unitaire des échantillons	Fréquence des prélèvements	Prélèvements à Mururoa	Prélèvements à Fangataufa
MILIEU ATMOSPHÉRIQUE ET TERRESTRE				
DOSIMÈTRES $CaSO_4$		tous les 3 mois	6 points	
AÉROSOLS (CASA 110)	1 filtre	journalière	1 point	
SOLS	1 kg	tous les 4 ans	8 points	6 points
EAU DE COCO	10 l	annuelle	4 zones	1 zone
COPRAH	4 kg	annuelle	4 zones	1 zone
LAGON				
EAUX DE LAGON	2x30 l + 2x50 ml	annuelle	9 points	5 points
SÉDIMENTS	1 kg	annuelle	9 points	5 points
PLANCTON	500 g	annuelle	1	1
CHIRURGIEN éviscéré	3 kg	annuelle	2 zones/4	1 zone
TROCA chair	2 kg	annuelle	2 zones/4	1 zone
MÉROU chair	3 kg	annuelle	2 zones/4	1 zone
MILIEU OCEANIQUE PROCHE, PLATIER ET PENTE EXTERNE				
TURBO chair	2 kg	annuelle	2 zones/4	1 zone
EAUX FLANCS D'ATOLL (3 Cotes)	2 x 50 ml	annuelle	1 zone/4 (6 points)	1 zone (4 points)
PLANCTON FLANCS D'ATOLL	500 g	annuelle	1 zone/4	1
CREVETTES PROFONDES	3 kg	annuelle	1	-
POISSONS PÉLAGIQUES COTIERS chair	3 kg	annuelle	1	1
MILIEU OCÉANIQUE DANS LA LIMITE DES 12 MILLES NAUTIQUES				
EAUX OCÉANIQUES	2x30 l + 2x50 ml	tous les 4 ans	1 point (6 profondeurs)	
PLANCTON	500 g	tous les 4 ans	1	
POISSONS PÉLAGIQUES HAUTURIERS chair	3 kg	annuelle	1	
EAUX SOUTERRAINES				
EAUX SOUTERRAINES	10 l + 2x50 ml	annuelle	13 points lagon 3 points à terre	4 points lagon

VII.4.2.2 - MESURE DE LA RADIOACTIVITÉ

Depuis la fin des essais atmosphériques en 1974, la radioactivité d'origine artificielle dans l'environnement n'a cessé de décroître pour atteindre des niveaux d'activité très faibles, uniquement quantifiables en utilisant les techniques les plus performantes disponibles dans les laboratoires de mesure. C'est pourquoi les échantillons de la biosphère et de la géosphère sont rapportés en métropole pour y être analysés et exploités par les laboratoires de la DAM qui ont développé des compétences spécifiques et disposent d'équipements performants permettant la mesure des radionucléides présents à l'état de traces dans l'environnement. Ces laboratoires de mesure sont accrédités par le Comité français d'accréditation (Cofrac) et agréés par les ministères en charge de l'industrie, de la santé et de l'environnement pour réaliser des mesures de radioactivité sur des échantillons de l'environnement.

L'ensemble des échantillons font l'objet d'une mesure des radionucléides émetteurs gamma par spectrométrie gamma directe. L'analyse directe de l'activité du tritium et celles du ^{90}Sr et des isotopes du plutonium après radiochimie sont réalisées sur une sélection d'échantillons (Tableau 79).

TABLEAU 79.
Radionucléides recherchés en fonction de la nature des échantillons prélevés dans le cadre de la surveillance continue et au cours de la campagne annuelle Turbo.

	Radionucléides	Aérosols	Eau de lagon	Sédiment de lagon	Sols	Eau souterraine	Eau flanc d'atoll	Eau océanique	Prélèvements biologiques
	HTO (eau tritiée)*		●			●	●	●	
NATURELS	^{7}Be	●							
	^{22}Na	●							
	^{40}K	●		●	●				●
	^{210}Pb	●		●	●				
	^{226}Ra			●	●				
	^{228}Th			●	●				
	^{228}Ac			●	●				
	^{234}Th			●	●				
	^{235}U			●	●				
ARTIFICIELS	^{60}Co			●	●				●
	^{90}Sr		●	●	●	●		●	●
	^{125}Sb			●	●				
	^{137}Cs	●	●	●	●	●		●	●
	^{155}Eu			●	●				
	^{238}Pu	●	●	●	●	●		●	●
	$^{239+240}Pu$	●	●	●	●	●		●	●
	^{241}Am			●	●				

*: origine naturelle et artificielle

L'ensemble des résultats de mesures font l'objet d'un rapport annuel de surveillance radiologique spécifique des anciens atolls d'expérimentations. Ce rapport est présenté chaque année par le DSCEN devant l'autorité de sûreté (DSND) et analysé par les membres de la C3S.

Depuis la fin des essais souterrains en 1996, aucune augmentation de la radioactivité d'origine artificielle n'a été détectée dans les échantillons prélevés dans les différentes composantes de l'environnement des deux atolls de Mururoa et Fangataufa.

VII.5 - CONCLUSION

Les opérations d'assainissement d'installation et de remédiation de sol ont été entreprises lorsqu'elles étaient justifiées par des risques d'expositions radiologiques du personnel en poste sur les sites d'expérimentations. Les actions les plus importantes ont été menées pendant la période d'exploitation des sites. Pour l'atoll de Mururoa, elles ont concerné l'assainissement de la zone Faucon à la suite de la retombée de l'essai Parthénope, le nettoyage des zones du secteur Nord utilisées pour les expériences Arpège et pour les essais de sécurité, la récupération des particules marquées par le plutonium dispersées sur les plages de Mururoa, l'assainissement et le démantèlement de l'installation Meknès. Pour l'atoll de Fangataufa, elles ont concerné la décontamination du PEE Empereur à la suite des retombées de l'essai Rigel.

Lors de la clôture définitive du CEP, afin de remettre les sites d'expérimentations dans un état aussi proche que techniquement possible de leur état d'origine, des opérations complémentaires d'assainissement radiologique ont été réalisées lors du démantèlement des installations ayant contenu des substances radioactives, afin de les libérer des contraintes radiologiques dans le futur. Ainsi, l'assainissement de la radioactivité résiduelle a porté sur les installations à caractère nucléaire, à savoir : la station de décontamination, le bâtiment de traitement des solides et les locaux du laboratoire de mesure de la radioactivité. De même, un contrôle radiologique a été réalisé sur toutes les barges opérationnelles, les apparaux de mouillage et les matériels de forage avant cession et, d'une manière générale, sur tous les matériels en place dans les installations à caractère nucléaire comme celles utilisées pour le stockage des sources radioactives, les laboratoires de radiobiologie, de mesures de radioactivité, etc.

Les déchets radioactifs générés par ces assainissements ont fait l'objet d'une gestion adaptée à leurs niveaux d'activité et à la situation du site, en conformité avec les pratiques autorisées par la réglementation au moment de leur élimination. Ainsi, en fonction de leur niveau d'activité les déchets ont fait l'objet de conditionnements, d'entreposage et de stockage spécifiques. Les immersions de déchets radioactifs ont été réalisées en suivant les prescriptions en vigueur à la date d'immersion édictées par l'AIEA pour le compte de la Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion des déchets. Les valeurs des activités totales en alpha et bêta-gamma, comparées à celles des limites préconisées par l'AIEA, montrent que les déchets radioactifs étaient individuellement peu contaminés. Le niveau élevé du tonnage immergé est dû à l'importance des masses des équipements immergés ainsi qu'aux matériaux de conditionnement. En effet, la masse du béton utilisé pour les coques des viroles et comme matrice pour immobiliser les déchets dans les conteneurs a été comptabilisée en tant que déchet. En complément, des déchets contenant des radionucléides émetteurs alpha, conditionnés dans des fûts et des viroles ou en vrac, ont été stockés dans deux puits, PS1 et PS3, situés dans le secteur Nord de l'atoll de Mururoa. De plus, la partie supérieure de 25 puits situés sur la couronne terrestre de l'atoll de Mururoa ont été obturés, à partir de 1981, à l'aide des matériaux contaminés à des niveaux d'activités inférieurs aux limites imposant leur stockage dans les puits PS1 et PS3.

À l'issue de la dernière campagne d'essais, la politique de transparence décidée par le Président de la République s'est traduite par la réalisation, à la demande du gouvernement français, d'études internationales sur l'évaluation des effets des expérimentations sur l'environnement et les populations. L'AIEA a conduit une étude sur la situation radiologique actuelle et future des atolls de Mururoa et Fangataufa après 30 ans d'essais. Dans le même temps, une étude complémentaire sur la stabilité géologique et sur l'hydrogéologie de Mururoa et Fangataufa a été confiée à un groupe d'experts, l'*International geochemical commission*, réuni sous la responsabilité du Professeur Charles Fairhurst (Université du Minnesota, États-Unis). Les deux expertises ont fait l'objet de rapports publiés en 1998. L'expertise de l'AIEA sur les risques radiologiques associés aux résidus radioactifs piégés dans les sédiments des lagons et confinés dans les cavités-cheminées, en fonction de l'évolution géomécanique des atolls a conclu « *qu'il n'y aura aucun effet sur la santé qui puisse être diagnostiqué médicalement chez un individu ou décelé dans un groupe par des études épidémiologiques et qui serait attribuable aux doses de rayonnements estimées qui sont reçues actuellement ou qui seraient reçues à l'avenir par des personnes du fait des matières radioactives résiduelles présentées à Mururoa et Fangataufa* ». En outre, «*l'étude a permis d'évaluer les débits de doses au milieu biologique résultant des matières radioactives résiduelles présentes à Mururoa et à Fangataufa et il a été constaté qu'ils étaient analogues ou inférieurs aux débits de doses dus aux sources naturelles de rayonnements* ».

Aujourd'hui, la surveillance des sites comporte deux volets : géomécanique et radiologique. La surveillance géomécanique des atolls d'expérimentations comprend un suivi continu d'indicateurs représentatifs de l'évolution des mouvements du massif géologique de Mururoa et la réalisation périodique de campagnes d'observation, offrant une vue plus globale de l'évolution des atolls de Mururoa et de Fangataufa. Le suivi géomécanique continu de l'atoll de Mururoa permet de connaître en permanence toute évolution géologique pouvant mettre en jeu la sécurité des personnes se trouvant sur l'atoll. L'atoll de Fangataufa, inhabité et où aucun mouvement majeur n'a été mis en évidence, ne nécessite pas le maintien d'une telle surveillance.

L'expertise radiologique réalisée à Mururoa et Fangataufa en 1998 par l'AIEA a également conclu «*qu'il n'était pas nécessaire de poursuivre la surveillance de l'environnement de Mururoa et Fangataufa à des fins de protection radiologique* ». Toutefois, il a été décidé de continuer à surveiller la radioactivité dans l'environnement des sites afin de vérifier qu'il n'y avait pas d'augmentation anormale de l'activité des radionucléides au sein des différentes composantes de la biosphère. Cette surveillance permet de vérifier que l'évolution de l'activité des radionucléides migrant dans la géosphère à partir des systèmes cavité-cheminée débouchant dans la base des formations carbonatées des atolls est conforme aux prévisions. Depuis l'arrêt des essais souterrains, une surveillance très complète des différents compartiments naturels des atolls est effectuée avec une fréquence des prélèvements ajustée à la très faible variabilité au cours du temps de l'activité résiduelle des radionucléides. Depuis 1996, aucune anomalie dans les niveaux d'activité n'a été détectée dans les échantillons prélevés dans l'environnement des deux atolls d'expérimentations.

La surveillance radiologique des anciens atolls d'expérimentations est complétée par celle des produits alimentaires réalisée par l'IRSN. Ce contrôle a mis en évidence une baisse régulière de la radioactivité d'origine artificielle pour l'ensemble des aliments de la Polynésie qui aujourd'hui a atteint des niveaux inférieurs aux limites de détection pour la quasi totalité des radionucléides libérés lors des essais atmosphériques.

VII.6 - BIBLIOGRAPHIE

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1999). - Inventory of Radioactive Waste Disposals at Sea. IAEA TECDOC Series No. 1105.AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1998). - Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes. Technical Reports Series No. 389. AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1998). - Situation radiologique sur les atolls de Mururoa et de Fangataufa: Rapport Principal. Radiological Assessment Reports. AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1998). - Situation radiologique sur les atolls de Mururoa et Fangataufa, AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1998). - The Radiological Situation at the Atolls of Mururoa and Fangataufa Technical Report Volume 3 Inventory of radionucléides Underground at the Atolls. Radiological Assessment Reports.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1991) - Inventory of Radioactive Material Entering the Marine Environment: Sea Disposal of Radioactive Waste. IAEA TECDOC Series No. 588. AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1990). - Estimation of Radiation Risks at Low Dose (A Report to the Contracting Parties to the Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter) IAEA TECDOC Series No. 557. AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1988). - Assessing the Impact of Deep Sea Disposal of Low Level Radioactive Waste on Living Marine Resources. Technical Reports Series No. 288. AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1986). - Definition and Recommendations for the Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, 1972 - 1986 Edition. Safety Series No. 78. AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1984). - The Oceanographic and Radiological Basis for the Definition of High-level Wastes Unsuitable for Dumping at Sea. Safety Series No. 66. AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1984). - Environmental Assessment: Methodologies for Sea Dumping of Radioactive Wastes. Safety Series No. 65. AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1983). - Environmental Assessment: Methodologies for Sea Dumping of Radioactive Waste. IAEA TECDOC Series No. 296. AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1981). - Considerations Concerning "de Minimis" Quantities of Radioactive Waste Suitable for Dumping at Sea Under General Permit (report of An Advisory Group Meeting, Vienna, 2-6 July 1979). IAEA TECDOC Series No. 244. AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1978). - The Oceanographic Basis of the IAEA Revised Definition and Recommendations Concerning High-level Radioactive Waste Unsuitable for Dumping at Sea (Report of an Advisory Group meeting, Vienna, 21-25 March 1977). IAEA TECDOC Series No. 210. AIEA, Vienne, Autriche.

AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ENERGIE ATOMIQUE (1978). - The Radiological Basis of the IAEA Revised Definition and Recommendations Concerning High-level Radioactive Waste Unsuitable for Dumping at Sea (Report of a Consultants meeting, London, 13-17 June 1977). IAEA TECDOC Series No. 211. AIEA, Vienne, Autriche.

BAUDMGARTNER D.J. and DUEDALL I.W. (1990). - Oceanic Processes in Marine Pollution, Volume 6: Physical and Chemical Processes: Transport and transformation. Robert E. Kriegger publishing Company, Malabar Florida.

BOURROUILH F.G. et TALANDIER J. (1985) - Sédimentation et fracturation de haute énergie en milieu récifal : tsunamis, ouragans et cyclones et leurs effets sur la sédimentologie et la géomorphologie d'un atoll : motu et hoa à Rangiroa, Tuamotu - Marine Geology, 67, pp 263-333.

DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique (1998). - "Environmental Monitoring in French Polynesia and on the Mururoa and Fangataufa Sites, Year 1994," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française.

DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique (1998). - "Medium and LongTerm Containment of Underground Nuclear Tests at the CEP : Source Term Inventory and Worst Case Impact Assessment," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française.

DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique (1998). - "The Geological, Mechanical and Hydrogeological Environment of the Underground Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française.

DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique (1998). - "Overall Distribution and Characteristics of the Underground Nuclear Test Carried Out at Mururoa and Fangataufa and Their Effects on the Surrounding Media," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française.

DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique(1998). - "Structural Integrity and Stability of the Atolls _ Data and Modelling," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française.

DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique. (1998) - "Experimental Data on the Mobility of the radionucléides Deposited By the Underground Tests at Mururoa and Fangataufa Chapters 1 (Dissolution of Lava Formed by the Underground Tests), 2 (Retention of Radioelements Deposited by Underground Tests) and 3 (Mobility of Products Deposited by the Underground Safety Tests)," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française, 1998.

DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique (1998). - "Current Underground Distribution of radionucléides at Mururoa and Fangataufa," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française.

DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique (1998). - "Fangataufa : Overall Assessment of the Short, Medium and Long Term Radiological Situation of the Atolls of Mururoa and Fangataufa," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française.
DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique (1998). - "Marine Data and Modelling," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française.
DIRECTION DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES/Commissariat à l'Energie Atomique. (1998) - "Guide de Surveillance Géomécanique des Atolls de Mururoa et Fangataufa," in Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa and Fangataufa. Paris : La Documentation Française, 1998.
INTERNATIONAL GEOMECHANICAL COMMISSION (1999). - Stability and Hydrology Issues Related to Underground Nuclear Testing in French Polynésia : Volume I: General Results, Volume II: Technical Analyses et Volume III, Les Essais Nucléaires Souterrains en Polynésie Française: Stabilité et Hydrogéologie. La Documentation Française, Paris France.
JAMES N. P. and GINSBURG R. N. (1979). - The Seaward Margin of Belize Barrier and Atoll Reefs. Oxford: Blackwell Scientific Publications, Int. Assoc. of Sedimentologists, Special Publication No. 3.
JANKOVI'C I. (1997). - High Order Analytic Elements in Modeling Groundwater Flow. Ph.D. thesis, University of Minnesota.
JANKOVI'C I. and R. Barnes (1997) Threedimensional flow through large numbers of spheroidal inhomogeneities. J. Hydrology.
KERSTING A. B. (1996) The state of the hydrologic source term. Tech. Rep. UCRLID126557, Lawrence Livermore National Laboratory.
KULLENBERG G. (1982). Pollutant Transfer and Transport in the Sea. 2 volumes. CRC Press Roca Raton, Florida USA.
LALOU C., REYSS J. L. and BOICHARD R. (1988) Relations entre certains aspects de la sédimentation carbonatée dans le golf arabo-persique et les niveaux de stagnation concomitante de la mer au cours des 500 000 dernières années. C. R Acad. Sci. Paris, 307, 1211–1216.
LAM R. K. (1974) Atoll permeability calculated from tidal diffusion. J. Geophys. Res., 79(21), 3073–3081.
LAMA R. D. and VUTUKURI V. S. (1978) Handbook of Mechanical Properties of Rocks, vol. 2. Clausthal: Trans Tech Publications.
LEE H. J. and EDWARDS B. D. (1986) Regional method to assess offshore slope stability. ASCE J. Geotech. Eng., 112(5), 489–509.
MAENCHEN G. and SACK S. (1964) The Tensor code. In Methods in Computational Physics, vol. 3, pp. 181–210, Academic Press, Inc., New York.
MARIOTTI C. (1990) Propriétés Rhéologiques de Roches Tendres. Etudes Expérimentales et Numériques. Ph.D. thesis, Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Paris.
MARIOTTI C. and BOUCHEZ J. (1989) Différences rhéologiques sous pression de confinement entre des craies tendres naturelles et synthétiques. In V. Maury and D. Fourmaintraux (editors), Rock at Great Depth (Proceedings of the ISRM/SPE International Symposium, August 1989, Pau), pp. 93–99, Balkema, Rotterdam.
MARIOTTI C. and THOMAS F. (1994) Loi de comportement ARMOR pour géomatériaux sous chargement dynamique. J. de Physique IV, 4, C8577–C8582.
MULLINS H. T., GARDULSKI A. F. and HINE A. C. (1986) Catastrophic collapse of the west Florida carbonate platform margin. Geology, 14(2), 167–170.
NEWMARK N. M. (1965) Effects of earthquakes on dams and embankments. Géotechnique, 15(2), 139–159.
NIELD D. A. and BEJAN A. (1992) Convection in Porous Media. New York: SpringerVerlag.
NIKOLAEVSKIY V. N. (1959) Convective diffusion in porous media. J. Appl. Math. &Mech., 23(6), 1492–1503.
NIKOLAEVSKIY V. N. (1990) Mechanics of Porous and Fractured Media. Singapore: World Scientific.
NIKOLAEVSKIY V. N. (1996) Geomechanics and Fluidodynamics. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.
OBERDORFER J. A., HOGAN P. J. and BUDDEMEIER R. W. (1990) Atoll island hydrogeology: Flow and freshwater occurrence in a tidally dominated system. J. Hydrology, 120, 327–340.
OKUBO A. (1973) Effect of shoreline irregularities on stream wise dispersion in estuaries and other embayments. Netherlands J. Sea Research, 6, 213–224.
PATTEN B.C. (1971). Systems Analysis and Simulation in Ecology. 3 volumes. Academic Press New York and London.
PETERSON E., LIE K., RIMER N., NILSON R. and HIGGINS G. (1991) Thermodynamic evolution of nuclear cavities. In Proceedings of the 6th Symposium on Containment of Underground Nuclear Explosions (University of Nevada, Reno, September 1991), vol. 1, pp. 257–274, Livermore, California: Lawrence Livermore National Laboratory.
POULIKAKOS D. (1985) On buoyancy induced heat and mass transfer from a concentrated source in an infinite porous medium. Int. J. Heat Mass Transfer, 28(3), 621–629.
PRIOR D. B. and COLEMAN J. M. (1984) Submarine Slope Instability, pp. 419–455. Chichester: John Wiley & Sons.
PROFFER W. J. and E. HALDA J. (1993) Distinct element modeling of latetime containment phenomena. In Proceedings of the 7th Symposium on Containment of Underground Nuclear Explosions (CONF9309103), vol. 2, pp. 61–85, Lawrence Livermore National Laboratory.
RAESI E. and MYLORIE J. E. (1995) Hydrodynamic behavior of caves formed in the freshwater lens of carbonate islands. Carbonates & Evaporates, 10(2), 207–214.
RAITT R. W. (1954) Seismic refraction studies of Bikini and Kwajalein Atolls. Tech. Rep. Professional Paper 260K, U.S. Geological Survey.
RICHTMYER R. D. and MORTON K. W. (1967) Difference Methods for Initial value Problems. Interscience Publishers, 2nd edn.
ROUGERIE F. and WAUTHY B. (1993) The end of upwelling concept: From geothermal convection to reef construction. Coral Reefs, 12, 19–30.
RUZIE R. and GACHON A. (1985) Apport des techniques géophysiques à l'étude des carbonates dans les atolls: Application à L'Atoll de Mururoa. In Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress (Tahiti, 1985), vol. 3, pp. 381–388.
SAMADEN G., DALLOT P. and ROCHE R. (1985) Atoll d'Eniwetok: Système géothermique insulaire à l'état naturel. La Houille Blanche, 2, 143–151.
SCHOCK R. N., HEARD H. C. Heard, SWIFT R. P. and WALTON O. R. (1980) In situ fracture related to energy and resource recovery. In Proceedings of the 7th International AIRAPT Conference (Le Creusat, 1979), vol. 2, pp. 902–912, Oxford: Oxford University Press.
SCHULTZ R. A. (1995) Limits on strength and deformation properties of jointed basaltic rock masses. Rock Mech. & Rock Eng., 28, 1–15.
SEDOV L. I. (1992) Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. Boca Raton, Florida: CRC Press, 10th edn.

SEED H. B. (1968) Landslides during earthquakes due to soil liquefaction. ASCE J. Soil Mech. & Foundations Div., 94(SM5), 1055–1121.
SEED H. B. and M. S. Rahman (1978) Wave induced pore pressure in relation to ocean floor stability of cohesionless soils. Marine Geotech., 3(2), 123–150.
SHACKLETON N. J. (1987) Oxygen isotropes, ice volumes and sea level. Quartern. Sci. Rev., 6, 183–190.
SKI (1997) Glaciation and hydrology workshop on the impact of climate change and glaciations on rock stresses, groundwater flow and hydrochemistry — past, present and future. Tech. Rep. 97:13, Swedish Nuclear Inspectorate.
SMITH D. K., NAGLE R. J. and KENNEALLY J. M. (1996) Transport of gaseous fission products adjacent to an underground nuclear test cavity. Radiochimica Acta, 73, 177–183.
SOKOLNIKOFF I. S. (1956)Mathematical Theory of Elasticity. New York: McGrawHill.
STALLMAN R. W. (1960) Notes on the use of temperature data for computing Groundwater velocity. In Proceedings of the 6th Assembly on Hydraulics (Nancy, France, 1960), vol. 1, rapp. 3, pp. 1–7, Paris: Société Hydrotechnique de France.
STALLMAN R. W. (1965) Steady onedimensional fluid flow in a semiinfinite porous medium with sinusoidal surface temperature. J. Geophys. Res., 70(12), 2821–2827.
STARFIELD A. M. and CUNDALL P. A. (1988) Towards a methodology for rock mechanics modelling. Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr., 25(3), 99–106.
SWARTZ J. H. (1958) Geothermal measurements on Eniwetok and Bikini atolls. Tech. Rep. Professional Paper 260U, U.S. Geological Survey.
TAZIEFF H. (1982) Rapport d'Haroun Tazieff sur l'ensemble de la mission scientifique en Polynesie Française. Tech. rep.
TIMOSHENKO S. P. and GOODIER J. N. (1987) Theory of Elasticity. New York : McGrawHill.
TOWNLEY L. R. (1993) AQUIFEMP: A periodic finite element aquifer flow model: User's manual and description, version 1.0 (plus software). Tech. Rep. 93/13, CSIRO Division ofWater Resources.
TOWNLEY L. R. (1995) The response of aquifers to periodic forcing. Adv. Water Resources, 18(3), 125–146.
UNDERWOOD M. R., PETERSON F. L. and VOSS C. I. (1992) Groundwater lens dynamics of atoll islands. Water Resources Research, 28(11), 2889–2902.
VACHER H. L. and QUINN T. M. Eds. (1997) Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands. Amsterdam: Elsevier Science BV.
VUTUKURI V. S., LAMA R. D. and SALUJA S. S. (1974) Handbook on Mechanical Properties of Rocks, vol. 1. Clausthal: Trans Tech Publications.
WATSON E. J. (1983) Dispersion in oscillating pipe Àow. J. FluidMech., 133, 233–244.
WEBSTER I. T. and TAYLOR J. H. (1992) Rotational dispersion in porous media due to fluctuating flows. Water Resources Res., 28(1), 109–119.
WHEATCRAFT S. W., BUDDEMEIER R. W. (1981) Atoll island hydrology. GroundWater, 19(3), 311–320.
WILKINS M. L. (1964) Calculation of elastic-plastic flow. In Methods in Computational Physics, vol. 3, pp. 211–263, Academic Press, Inc., New York.
WILLIAMS J. A., WADA R. N. and WANG R. (1970) Model studies of tidal effects on groundwater hydraulics. Tech. Rep. 39, University of Hawaii, Water Resources Research Center.
WINTERER, E. L. (1973) Sedimentary facies and plate tectonics of equatorial Pacific. Bull. Am. Assoc. Petr. Geologists, 57, 265–282.
ZEL'DOVICH Y. B. and RAIZER Y. P. (1967) Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena. Academic Press, London.

ANNEXE 1

Radionucléides et rayonnements

Cette annexe présente les notions de base sur la radioactivité, les rayonnements et les réactions en chaîne mises en jeu lors de l'essai d'explosion d'un engin nucléaire.

A1.1 - NOTION D'ATOME

Toute matière, minérale ou vivante, est constituée d'atomes. Les atomes sont eux-mêmes composés d'un noyau et d'électrons. Le noyau est constitué de particules fondamentales, appelées nucléons : les neutrons et les protons, de masses sensiblement identiques. Le proton porte une charge électrique positive, tandis que le neutron est sans charge électrique. Le nombre de charge du noyau est donc la somme des charges portées par les protons. Au niveau de l'atome, la charge est neutralisée par la présence d'électrons de charge négative, en nombre identique à celui des protons de masse très faible gravitant autour du noyau.

Le nombre d'électrons, Z, égal à celui des protons, est appelé numéro atomique. Le nombre de nucléons du noyau donne la masse de l'atome A, appelé nombre de masse. Tous les éléments chimiques sont ainsi définis par leur numéro atomique Z et leur nombre de masse A. Chacun d'eux est référencé par un symbole spécifique se représentant ainsi :

$$^{A}_{Z}X_{N}$$

Un même élément chimique peut avoir un nombre de neutrons (N) différent, donc des masses atomiques différentes qui correspondent aux différents isotopes de l'élément. Les isotopes d'un élément ont les mêmes propriétés chimiques puisque celles-ci sont déterminées par le nombre d'électrons. En revanche, ils n'ont pas les mêmes propriétés physiques car leur masse est différente.

Par exemple, l'élément plutonium, symbole Pu, de numéro atomique Z = 94 a plusieurs isotopes dont le nombre de neutrons diffère : 150 pour un nombre de masse 244 (^{244}Pu), 145 pour un nombre de masse 239 (^{239}Pu), etc.

A1.2 - RAYONNEMENTS ET DÉCROISSANCE RADIOACTIVE

La cohésion du noyau est assurée par différentes forces maintenant ensemble les nucléons. Les noyaux sont stables lorsque le rapport neutrons/protons se situe entre les valeurs idéales de 1 à 1,6 qui varient suivant la masse atomique du noyau. Pour les éléments légers, ce rapport est égal à 1, soit un nombre de neutrons identique à celui des protons, et pour les éléments les plus lourds il est égal à 1,6, soit un nombre de neutrons de 60 % plus élevé que celui de protons. Lorsque la valeur de ce rapport diffère des valeurs idéales, traduisant un déséquilibre important entre le nombre de neutrons et de protons, le noyau est instable. Les isotopes ayant un noyau instable sont appelés isotopes radioactifs ou radionucléides.

Les noyaux instables subissent spontanément des modifications qui les conduisent progressivement vers des états plus stables en générant l'émission d'une particule, ou de rayonnements.

Ces transformations, appelées désintégrations radioactives, entraînent une décroissance progressive du nombre d'atomes de ce radionucléide suivant une vitesse qui lui est spécifique. Les désintégrations sont aléatoires, il est impossible de prévoir l'instant auquel elles vont se produire ; spontanées, elles se produisent sans aucune intervention extérieure ; inéluctables, un noyau radioactif se désintégrera tôt ou tard. Enfin, elles sont indépendantes de la combinaison chimique, dont le noyau radioactif fait partie, et des paramètres extérieurs tels que la pression ou la température.

La radioactivité d'une substance radioactive est caractérisée par le nombre de désintégrations nucléaires par unité de temps (activité). L'unité d'activité du Système international (SI) est le becquerel (Bq) qui correspond à une désintégration par seconde.

A1.2.1 - PÉRIODE RADIOACTIVE

L'activité d'un radionucléide présent dans une substance radioactive décroît avec le temps, suivant une loi exponentielle. La période physique d'un radionucléide est le temps nécessaire pour que l'activité diminue de moitié du fait de la décroissance radioactive. Elle est constante pour chaque radionucléide.

La période du ^{239}Pu est de 24 110 ans, celle du ^{137}Cs de 30,15 ans, du tritium de 12,35 ans, du ^{140}Ba de 12,765 jours. Pour les isotopes d'un même élément les périodes peuvent être très différentes, comme dans le cas de l'iode : $1,57\ 10^7$ ans pour ^{129}I, 8 jours pour ^{131}I, 4,18 jours pour ^{124}I, 20,8 heures pour ^{133}I, 13,21 heures pour ^{123}I, 6,55 heures pour ^{135}I, 2,30 heures pour ^{132}I.

A1.2.2 - PÉRIODE BIOLOGIQUE ET PÉRIODE EFFECTIVE

Par analogie avec la période radioactive, la période biologique est le temps nécessaire à un organisme vivant pour éliminer, par des processus biologiques, la moitié de la quantité d'un radionucléide contenu dans ses tissus.

La période effective est la combinaison des périodes radioactive et biologique. Elle permet d'apprécier la vitesse globale à laquelle la quantité de matière radioactive présente dans un organisme diminue. La notion de période effective est également utilisée pour traduire la décroissance observée de l'activité des eaux de mer, intégrant la vitesse de décroissance des radionucléides due aux processus de dispersion et de diffusion ainsi que leur transfert aux sédiments, ainsi que la décroissance due à leur période radioactive.

A1.2.3 - VALLÉE DE LA STABILITÉ

Tous les noyaux connus peuvent être classés dans un graphique, appelé diagramme de Segré, représentant le nombre de neutrons N en fonction du nombre de protons Z (Fig. 205). Quatre zones sont classiquement distinguées :

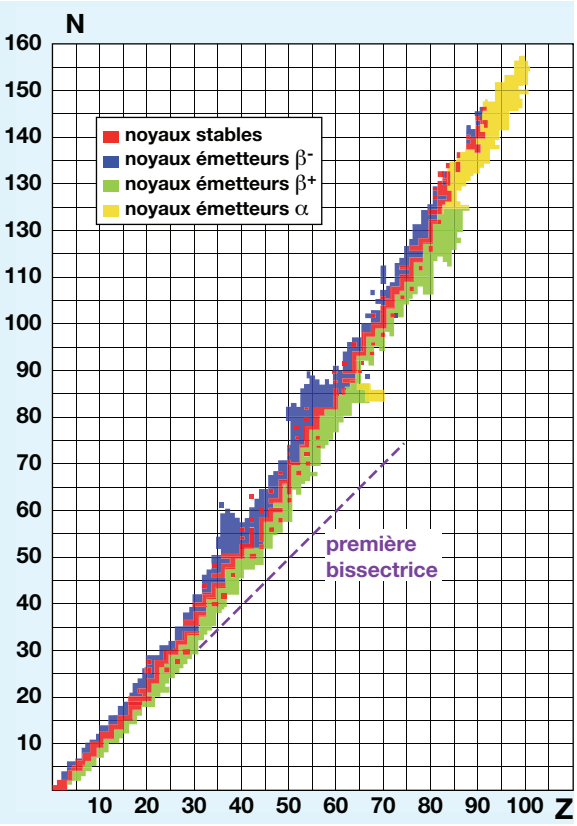


FIG. 205. - Diagramme de Segré
(*voir explications dans le texte ci-dessus*).

- Une zone centrale, rouge, appelée vallée de stabilité est constituée des noyaux stables. On note que pour Z < 30 les noyaux stables sont situés près de la première bissectrice, où N = Z.

- Une zone jaune, où se situent des noyaux donnant lieu à une radioactivité de type alpha. Ce sont des noyaux lourds (A est grand).

- Une zone bleue, où se situent des noyaux donnant lieu à une radioactivité de type bêta$^-$. Il s'agit de noyaux présentant un excès de neutrons, par rapport aux noyaux stables de même nombre de masse A.

- Une zone verte où se situent des noyaux donnant lieu à une radioactivité bêta$^+$. Il s'agit de noyaux présentant un excès de protons par rapport aux noyaux stables de même nombre de masse A. Les forces électrostatiques entre protons sont plus fortes que les forces nucléaires entre nucléons.

A1.3 - TYPES DE RAYONNEMENTS

Un noyau instable peut devenir stable suivant plusieurs modes de désintégration, avec l'émission de différents types de rayonnements.

A1.3.1 - RAYONNEMENTS BÊTA

Suite à la transformation d'un neutron en proton, les noyaux instables ayant des neutrons en excès peuvent émettre un électron de charge négative, appelé particule bêta. Cette désintégration modifie le nombre de protons Z, faisant passer le numéro atomique de l'atome à Z+1, caractéristique de l'élément chimique suivant dans la classification périodique de Mendeleïev.

Cette désintégration peut se répéter au cours du temps, en fonction du niveau d'instabilité de l'atome créé. Dans le cas de noyaux lourds, ces désintégrations successives amenant le noyau à son état le plus stable sont décrites sous la forme de chaînes de désintégrations. Ainsi, l'isotope ^{238}U de l'uranium naturel se transforme successivement en 13 noyaux instables avant de parvenir à l'état stable sous la forme de l'isotope ^{206}Pb (Fig. 206).

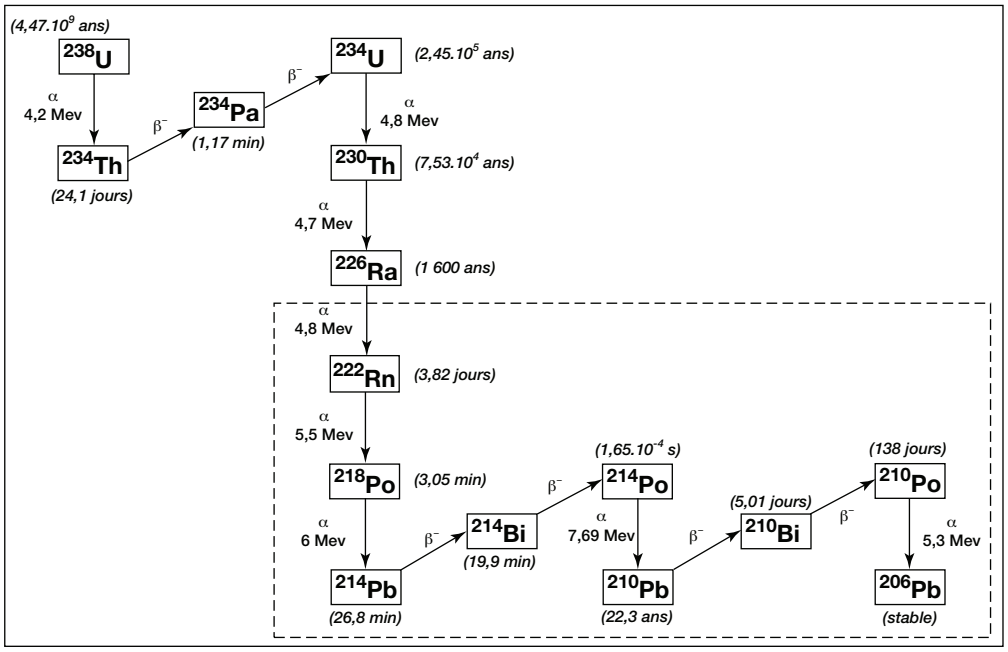


FIG. 206. - L'uranium 238 et ses descendants.

Lorsqu'un noyau est instable par excès de protons, l'un d'eux peut se transformer en neutron par émission d'une particule bêta, chargée positivement, appelée positon. Le nombre de protons du noyau est donc réduit d'une unité. Il devient, par conséquent, le noyau de l'élément de numéro atomique Z-1. La durée de vie d'un positon est très courte car, lorsqu'il rencontre un électron, tous deux s'annihilent pour donner de l'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique gamma.

A1.3.2 - RAYONNEMENTS GAMMA

Le rayonnement gamma est un rayonnement électromagnétique généralement émis lors de la réorganisation du noyau après une désintégration bêta. C'est le cas du noyau de ^{137}Cs, qui par désintégration bêta, évolue vers un état plus stable, de période courte (2,3 min), celui du ^{137m}Ba libérant ensuite de l'énergie sous forme d'un rayonnement gamma de 662 keV.

A1.3.3 - RAYONNEMENTS ALPHA

Le rapport neutrons/protons des noyaux instables les plus lourds, à savoir les éléments dont le numéro atomique est supérieur à 80, peut être modifié par l'émission d'une particule composée de deux protons et de deux neutrons. Cette particule, identique au noyau d'un atome d'hélium, ^{4}He, est appelée particule alpha. C'est le cas du noyau de ^{239}Pu qui, par désintégration alpha, évolue vers un état plus stable, celui du noyau de ^{235}U.

A1.3.4 - AUTRES TYPES DE RAYONNEMENTS

Les autres principaux types de rayonnements sont :

- Le rayonnement X, rayonnement électromagnétique pouvant être émis au cours d'une désintégration. D'énergie plus faible que les rayons gamma, les rayons X sont émis lors des réarrangements des électrons de l'atome.
- Le rayonnement neutronique issu des neutrons pouvant être émis en général au cours de réaction de fission ou de fusion nucléaire.

A1.4 - RAYONNEMENTS ET POUVOIR DE PÉNÉTRATION

Les rayonnements alpha, bêta et gamma sont qualifiés de rayonnements ionisants. En effet, lors de leurs interactions avec la matière, ils peuvent transférer suffisamment d'énergie aux atomes qui la constituent pour provoquer l'éjection de leurs électrons orbitaux ainsi que la formation d'ions possédant une charge positive ; c'est le processus d'ionisation. Le taux d'ionisation de la matière sur la trajectoire d'une particule chargée la traversant dépend de sa masse, de sa charge et de sa vitesse. Dans le cas du rayonnement gamma le taux d'ionisation dépend de l'énergie gamma.

Les particules lourdes, comme les particules alpha, possèdent une forte charge et perdent rapidement leur énergie sans pénétrer profondément dans la matière. Elles sont arrêtées par une feuille de papier ou la couche de cellules mortes de l'épiderme (Fig. 207).

Les particules bêta sont arrêtées par une feuille d'aluminium ; mais peuvent pénétrer dans les tissus d'un organisme vivant, jusqu'à quelques millimètres de profondeur.

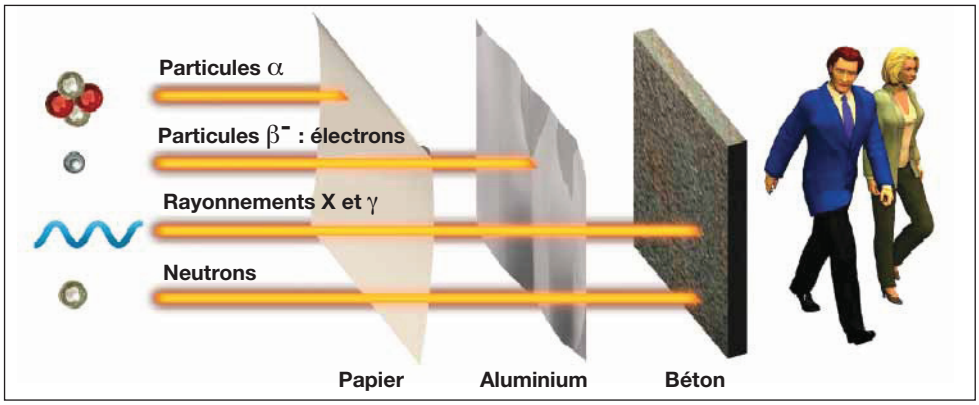


FIG. 207. - Pouvoir de pénétration des rayonnements ionisants (voir explications dans le texte ci-dessus).

Les rayons électromagnétiques, tels que les rayons X et gamma, ont un pouvoir de pénétration important, fonction de leur énergie. Ils peuvent traverser plusieurs dizaines de centimètres de tissus d'un organisme vivant. Une importante épaisseur de béton ou de plomb permet de s'en protéger.

A1.5 - RÉACTIONS EN CHAÎNE

Comme les réactions chimiques, les réactions nucléaires produisent de l'énergie. Si elles se poursuivent, s'amplifient, après avoir été amorcées, les énergies libérées peuvent être considérables. Il existe deux catégories de réactions nucléaires capables de fournir de telles énergies en un temps très court : les réactions de fission et de fusion. Les armes nucléaires utilisent ces deux types de réactions.

La fission s'applique à des noyaux lourds, de nombre atomique élevé, tels que le ^{235}U et le ^{239}Pu. Lorsqu'un neutron libre pénètre dans un noyau d'atome fissile, celui-ci se divise en noyaux plus légers, en émettant des particules β et des neutrons libres, et en donnant naissance à un rayonnement électromagnétique γ (constitué de photons) très énergétique. Les particules α correspondent à la radioactivité spontanée de la matière fissile. Les deux ou trois neutrons éjectés au cours d'une désintégration sont en mesure de produire la fission de nouveaux noyaux et de déclencher ainsi une réaction en chaîne. Néanmoins, tous les neutrons produits ne provoquent pas de nouvelles réactions de fission, soit parce qu'ils traversent la matière sans interagir avec les noyaux de la matière fissile, soit parce qu'ils interviennent dans d'autres réactions.

Pour que la réaction en chaîne puisse se développer, il faut une masse de matière fissile supérieure à une valeur minimale appelée masse critique, de telle sorte que le nombre de neutrons produits ne puissent pas s'échapper de cette masse plus vite que le nombre de neutrons générés lors des fissions. La fission de tous les noyaux présents dans un kilogramme d'uranium-235 délivre une énergie équivalente à 14,5 kilotonnes de TNT. Les neuf dixièmes de cette énergie sont émis dans un temps de l'ordre de 10 nanosecondes.

La fusion nucléaire se produit lorsque deux noyaux d'atomes légers s'unissent pour former un atome plus lourd. Cette réaction provoque l'émission d'énergie et l'éjection d'un neutron. Les atomes légers qui fusionnent sont en général le deutérium et le tritium, tous deux isotopes de l'hydrogène. La réaction de fusion n'est initiée que si les noyaux légers possèdent une énergie importante qui les rapproche. Dans les explosions thermonucléaires, cette énergie est fournie aux éléments légers par des réactions de fission. La fusion de tous les noyaux présents dans 1 kilogramme de mélange deutérium-tritium dégage une quantité d'énergie correspondant à 81 kilotonnes de TNT.

Une explosion nucléaire libère donc, en un temps très court, une quantité considérable d'énergie qui trouve son origine dans les réactions de fission de noyaux lourds, de numéro atomique élevé, ^{235}U ou ^{239}Pu, réactions pouvant être stimulées par la fusion de noyaux légers d'isotopes de l'hydrogène, deutérium et tritium, lors du processus thermonucléaire.

ANNEXE 2

Liste des essais atmosphériques et souterrains réalisés au CEP

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

[1] : Essais de sécurité.

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

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

ESSAIS SOUTERRAINS				
Date et heure (TU)	Nom de l'essai	Lieu	Mode expérimental	Catégorie d'énergie[1]
1975				
05/06 - 18 h 15	ACHILLE	Fangataufa	Puits sous couronne récifale	A
26/11 - 00 h 48	HECTOR	Fangataufa	Puits sous couronne récifale	B
1976				
03/04 - 17 h 07	PATROCLE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
11/07 - 00 h 30	MÉNÉLAS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
22/07 - 19 h 00	CALYPSO	Mururoa	Puits sous couronne récifale	S
30/10 - 23 h 00	ULYSSE A	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
05/12 - 23 h 00	ASTYANAX	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
1977				
19/02 - 23 h 30	ULYSSE B	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
19/03 - 23 h 01	NESTOR	Mururoa	Puits sous couronne récifale	C
02/04 - 23 h 30	OEDIPE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
28/06 - 18 h 15	ANDROMAQUE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	S
06/07 - 23 h 00	AJAX	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
12/07 - 23 h 00	CLYTEMNESTRE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	S
12/11 - 01 h 30	ORESTE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
24/11 - 17 h 00	ÉNÉE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	C
17/12 - 22 h 00	LAOCOON	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
1978				
27/02 - 23 h 00	POLYPHÈME	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
22/03 - 17 h 30	PYLADE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
25/03 - 17 h 30	HÉCUBE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
01/07 - 17 h 00	XANTHOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
19/07 - 18 h 00	ARÈS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
26/07 - 23 h 00	IDOMÉNÉE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
02/11 - 18 h 00	SCHÉDIOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
14/11 - 18 h 00	APHRODITE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	S
30/11 - 17 h 32	PRIAM	Mururoa	Puits sous couronne récifale	C
17/12 - 18 h 04	ÉTÉOCLE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
19/12 - 16 h 57	EUMÉE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
1979				
01/03 - 17 h 24	PENTHÉSILÉE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
09/03 - 16 h 37	PHILOCTÈTE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
24/03 - 16 h 28	AGAPÉNOR	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
04/04 - 18 h 07	POLYDORE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
18/06 - 23 h 27	PYRRHOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
29/06 - 18 h 56	ÉGISTHE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	C
25/07 - 17 h 57	TYDÉE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	C
28/07 - 19 h 56	PALAMÈDE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
19/11 - 17 h 53	CHRYSOTÉMIS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
22/11 - 19 h 14	ATRÉE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A

[1] : Les catégories d'énergie pour les essais souterrains sont les suivantes :
A : < 5 kT
B : 5 à 20 kT
C : 20 à 150 kT

S : Essais de sécurité

ESSAIS SOUTERRAINS				
Date et heure (TU)	Nom de l'essai	Lieu	Mode expérimental	Catégorie d'énergie[1]
1980				
23/02 - 18 h 03	THYESTE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
03/03 - 17 h 56	ADRASTE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
23/03 - 19 h 37	THÉSÉE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	C
01/04 - 19 h 31	BOROS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
04/04 - 18 h 33	PÉLOPS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
16/06 - 18 h 27	EURYPLE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	C
21/06 - 17 h 01	ILUS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
06/07 - 17 h 27	CHRYSÈS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
09/07 - 18 h 03	LÉDA	Mururoa	Puits sous couronne récifale	S
19/07 - 23 h 47	ASIOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	C
25/11 - 17 h 53	LAËRTE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
03/12 - 17 h 33	DIOMÈDE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	C
1981				
27/02 - 23 h 28	BROTÉAS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
06/03 - 17 h 27	TYRO	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
28/03 - 17 h 23	IPHICLÈS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
10/04 - 17 h 57	CLYMÈNE	Mururoa	Puits sous lagon	B
08/07 - 22 h 23	LYNCÉE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
11/07 - 17 h 17	ERYX	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
18/07 - 17 h 43	THÉRAS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
03/08 - 18 h 33	AGÉNOR	Mururoa	Puits sous couronne récifale	C
06/11 - 17 h 03	LÉTO	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
11/11 - 17 h 07	PROCLÈS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
05/12 - 16 h 58	CILIX	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
08/12 - 16 h 47	CADMOS	Mururoa	Puits sous lagon	B
1982				
20/02 - 17 h 33	AÉROPE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
24/02 - 18 h 15	DÉIPHOBE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
20/03 - 17 h 03	RHÉSOS	Mururoa	Puits sous lagon	B
23/03 - 17 h 07	ÉVÉNOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
31/03 - 16 h 30	AÉSON	Mururoa	Puits sous couronne récifale	S
27/06 - 17 h 00	LAODICE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
01/07 - 17 h 02	ANTILOKOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	C
21/07 - 17 h 13	PITANE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
25/07 - 18 h 02	LAIOS	Mururoa	Puits sous lagon	C
27/11 - 17 h 02	PROCRIS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
1983				
19/04 - 18 h 53	EURYTOS	Mururoa	Puits sous lagon	C
25/04 - 17 h 33	AUTOMÉDON	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
25/05 - 17 h 31	CINYRAS	Mururoa	Puits sous lagon	C
18/06 - 17 h 31	BURISIS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
28/06 - 17 h 46	OXYLOS	Mururoa	Puits sous lagon	B
20/07 - 20 h 30	BATTOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
04/08 - 17 h 14	CARNABON	Mururoa	Puits sous lagon	C
03/12 - 16 h 58	LINOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
07/12 - 17 h 28	GYGÈS	Mururoa	Puits sous lagon	B

[1] : Les catégories d'énergie pour les essais souterrains sont les suivantes :
A : < 5 kT
B : 5 à 20 kT
C : 20 à 150 kT

S : Essais de sécurité

ESSAIS SOUTERRAINS				
Date et heure (TU)	Nom de l'essai	Lieu	Mode expérimental	Catégorie d'énergie[1]
1984				
08/05 - 17 h 26	DÉMOPHON	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
12/05 - 17 h 31	MIDAS	Mururoa	Puits sous lagon	C
12/06 - 17 h 16	ARISTÉE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
16/06 - 17 h 44	ÉCHÉMOS	Mururoa	Puits sous lagon	C
27/10 - 17 h 16	MACHAON	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
02/11 - 20 h 45	ACASTE	Mururoa	Puits sous lagon	C
01/12 - 16 h 51	MILÉTOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
06/12 - 17 h 29	MEMNON	Mururoa	Puits sous lagon	C
1985				
30/04 - 17 h 29	CERCYON	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
08/05 - 20 h 28	NISOS	Mururoa	Puits sous lagon	C
03/06 - 17 h 30	TALAOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
07/06 - 17 h 40	ERGINOS	Mururoa	Puits sous lagon	B
24/10 - 17 h 50	HÉRO	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
26/10 - 16 h 35	CODROS	Mururoa	Puits sous lagon	C
24/11 - 16 h 01	ZÉTÈS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
26/11 - 17 h 42	MÉGARÉE	Mururoa	Puits sous lagon	C
1986				
26/04 - 17 h 02	HYLLOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
06/05 - 16 h 58	CÉTO	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
27/05 - 17 h 15	STHÉNÉLOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	B
30/05 - 17 h 25	GALATÉE	Mururoa	Puits sous lagon	C
10/11 - 16 h 58	HÉSIONE	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
12/11 - 17 h 02	NAUPLIOS	Mururoa	Puits sous lagon	B
06/12 - 17 h 10	PÉNÉLÉOS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	A
10/12 - 17 h 15	CIRCÉ	Mururoa	Puits sous lagon	C
1987				
05/05 - 16 h 58	JOCASTE	Mururoa	Puits sous lagon	B
20/05 - 17 h 05	LYCOMÈDE	Mururoa	Puits sous lagon	C
06/06 - 18 h 00	DIRCÉ	Mururoa	Puits sous lagon	B
21/06 - 17 h 55	IPHITOS	Mururoa	Puits sous lagon	C
23/10 - 16 h 50	HÉLÉNOS	Mururoa	Puits sous lagon	C
05/11 - 17 h 30	PASIPHAÉ	Mururoa	Puits sous lagon	B
19/11 - 16 h 31	PELÉE	Mururoa	Puits sous lagon	C
29/11 - 17 h 59	DANAÉ	Mururoa	Puits sous lagon	B
1988				
11/05 - 17 h 00	NÉLÉE	Mururoa	Puits sous lagon	C
25/05 - 17 h 01	NIOBÉ	Mururoa	Puits sous lagon	C
16/06 - 17 h 15	ANTIGONE	Mururoa	Puits sous lagon	A
23/06 - 17 h 31	DEJANIRE	Mururoa	Puits sous lagon	B
25/10 - 17 h 00	ACRISIOS	Mururoa	Puits sous lagon	A
05/11 - 16 h 30	THRASYMÈDES	Mururoa	Puits sous lagon	C
23/11 - 17 h 01	PHÈRES	Mururoa	Puits sous lagon	C
30/11 - 17 h 55	CYCNOS	Fangataufa	Puits sous lagon	C

[1] : Les catégories d'énergie pour les essais souterrains sont les suivantes :
A : < 5 kT
B : 5 à 20 kT
C : 20 à 150 kT

S : Essais de sécurité

ESSAIS SOUTERRAINS				
Date et heure (TU)	Nom de l'essai	Lieu	Mode expérimental	Catégorie d'énergie[1]
1989				
11/05 - 16h 45	ÉPÉIOS	Mururoa	Puits sous lagon	B
20/05 - 17 h 59	TECMESSA	Mururoa	Puits sous lagon	A
03/06 - 17 h 30	NYCTÉE	Mururoa	Puits sous lagon	C
10/06 - 17 h 30	CYZICOS	Fangataufa	Puits sous lagon	C
24/10 - 16h 30	HYPSIPYLE	Mururoa	Puits sous lagon	C
31/10 - 16h 57	ÉRIGONE	Mururoa	Puits sous lagon	B
20/11 - 17 h 29	TROS	Mururoa	Puits sous lagon	B
25/11 - 18h 00	DAUNUS	Mururoa	Puits sous couronne récifale	S
27/11 - 17 h 00	LYCOS	Fangataufa	Puits sous lagon	C
1990				
02/06 - 17 h 30	TÉLÈPHE	Mururoa	Puits sous lagon	B
07/06 - 17 h 30	MÉGAPENTHÈS	Mururoa	Puits sous lagon	B
26/06 - 18h 00	CYPSÉLOS	Fangataufa	Puits sous lagon	C
04/07 - 18h 00	ANTICLÉE	Mururoa	Puits sous lagon	B
14/11 - 18h 12	HYRTACOS	Fangataufa	Puits sous lagon	C
21/11 - 17 h 00	THOAS	Mururoa	Puits sous lagon	C
1991				
07/05 - 17 h 00	MÉLANIPPE	Mururoa	Puits sous lagon	A
18/05 - 17 h 15	ALCINOOS	Mururoa	Puits sous lagon	C
29/05 - 19h 00	PÉRICLYMÉNOS	Fangataufa	Puits sous lagon	C
14/06 - 18h 00	PITTHÉE	Mururoa	Puits sous lagon	C
05/07 - 18h 00	CORONIS	Mururoa	Puits sous lagon	A
15/07 - 18h 10	LYCURGUE	Mururoa	Puits sous lagon	C
1995				
05/09 - 21 h 30	THÉTYS	Mururoa	Puits sous lagon	B
01/10 - 23h 30	PLOUTOS	Fangataufa	Puits sous lagon	C
27/10 - 22h 00	AEPYTOS	Mururoa	Puits sous lagon	C
21/11 - 21 h 30	PHÉGÉE	Mururoa	Puits sous lagon	C
27/12 - 21 h 30	THÉMISTO	Mururoa	Puits sous lagon	C
1996				
27/01 - 21 h 30	XOUTHOS	Fangataufa	Puits sous lagon	C

[1] : Les catégories d'énergie pour les essais souterrains sont les suivantes : A : < 5kT ; B : 5 à 20kT ; C : 20 à 150kT

S : Essais de sécurité.

Nota : Dans la catégorie A, 3 essais de sécurité souterrains sont inclus.

ANNEXE 3

Essais atmosphériques

De 1966 à 1996, 193 expérimentations nucléaires ont été effectuées au Centre d'expérimentation du Pacifique, sur les atolls de Mururoa et Fangataufa. 178 essais nucléaires ont consisté à faire exploser un engin nucléaire, avec libération d'une grande quantité d'énergie. Les 15 autres étaient des essais de sécurité.

Entre juillet 1966 et septembre 1974, 41 essais nucléaires ont été réalisés dans l'atmosphère et, entre juin 1975 et janvier 1996, 137 ont été effectués en grande profondeur, dans le massif géologique des atolls (cf. Chapitre IV).

L'énergie libérée par une explosion se mesure en kilotonnes (kt) d'équivalent trinitrotoluène (TNT). L'ensemble des essais effectués sur le site du CEP a été d'environ 13 000 kt, 10 000 kt pour les essais atmosphériques et environ 3 000 kt pour les essais souterrains.

Les essais nucléaires français représentent donc 3,6 % de l'énergie de fission et 2,3 % de l'énergie totale de tous les essais réalisés par l'ensemble des pays dotés d'armements nucléaires.

TABLEAU 80.
Récapitulatif de la répartition des types d'essais nucléaires et de sécurité effectués au CEP.

Essais	Mururoa	Fangataufa	Total
Essais nucléaires atmosphériques			
Barge	**3**	**1**	**4**
Ballon	**31**	**3**	**34**
Avion	**3**	**-**	**3**
Essais nucléaires souterrains			
Sous la couronne corallienne	**77**	**2**	**79**
Sous le lagon	**50**	**8**	**58**
Essais de securité			
Dans l'atmosphère	**5**	**-**	**5**
Souterrains	**10**	**-**	**10**

La France a également pratiqué, comme les autres puissances ayant développé un armement nucléaire opérationnel à des essais de sécurité destinés à s'assurer que les armes ne s'amorceraient pas d'elles-mêmes pendant leur transport ou leur stockage et que, dans tous les cas possibles d'accidents, il ne puisse y avoir de dégagement spontané d'énergie nucléaire. L'objectif technologique ultime est la sûreté intrinsèque de l'arme, la charge est dite alors «auto-sûre». Ces essais de sécurité ont conduit à la dispersion très localisée d'une fraction de matières nucléaires présentes dans l'engin. Entre 1966 et 1974, cinq essais de sécurité ont été effectués à l'air libre, à Mururoa, en zone Colette qui a été assainie par la suite (cf. Chapitre VII).

Entre 1974 et 1989, dix essais de sécurité ont été réalisés en souterrain, trois dans les formations volcaniques et sept dans celles carbonatées. Trois de ces expériences ont entraîné un faible dégagement d'énergie résultant de réactions de fission.

CAMPAGNE 1966

Dès la fin du mois de décembre 1964, la météorologie nationale fournissait au SMSR, les valeurs quotidiennes des vitesses et direction des vents à dix niveaux au-dessus du secteur intéressé par les futurs essais atmosphériques. À partir du 1er août 1965, elle lui transmettait quotidiennement deux séries de données correspondant respectivement à un découpage de l'atmosphère en dix couches de 1 500 m et 10 autres couches de 2 500 m. Il est rapidement apparu que les conditions météorologiques permettant de réaliser un essai atmosphérique en toute sécurité étaient établies 15 jours par mois, entre juin et septembre, avec des séquences de 3 à 6 jours consécutifs. En revanche, l'été austral, de janvier à mai, est apparu peu propice à la réalisation des essais avec 1 à 4 jours favorables non consécutifs. Afin de réduire le temps d'attente d'un créneau météorologique favorable pour chaque essai, il a été décidé d'organiser la première campagne d'essais atmosphériques au début du mois de juillet 1966.

Le premier semestre 1966 fut une période d'intense préparation pour terminer l'installation des atolls d'expérimentations. Dans le même temps, la volonté d'atteindre un niveau de sécurité maximal pour les populations résidant sur les îles et atolls polynésiens, proches et éloignés des sites d'expérimentations a conduit à l'installation de nombreux postes de mesures radiologiques et biologiques dans des atolls dont certains d'accès difficile (cf. Chapitre III). Dès le début de l'année, tous les moyens d'accueil des expérimentateurs étaient en place : bateaux bases, liaisons aériennes journalières inter-insulaires Papeete-Hao-Mururoa, qui ont permis les nombreuses recettes techniques et le réglage des appareils.

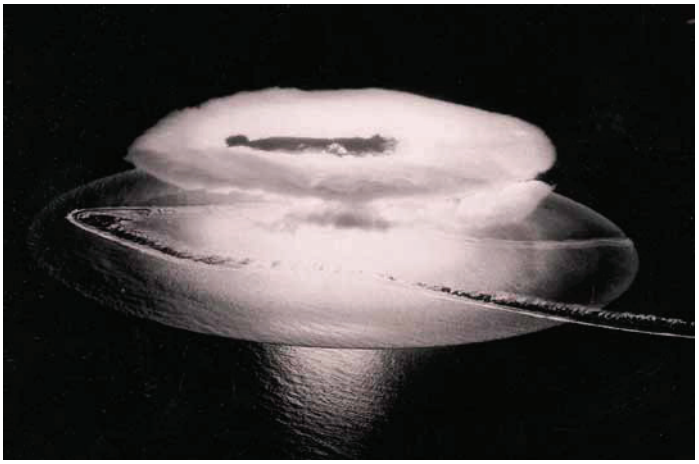
La campagne 1966 a concerné six essais atmosphériques, trois sur barge, un sous ballon, un par largage d'avion et un essai de sécurité sur tour. Du 11 au 13 juin, l'exercice API a permis de tester le fonctionnement de l'ensemble du dispositif opérationnel avant que n'ait commencé la première campagne d'essais au CEP. Celle-ci s'est déroulée en deux phases. La première a débuté par l'essai de faible puissance sur barge Aldébaran suivi de l'essai d'une arme larguée d'avion aux abords de Mururoa (Tamouré). La seconde phase a concerné trois essais de moyenne puissance : l'essai Bételgeuse avec, pour la première fois, une explosion en altitude sous ballon pour réduire les retombées sur les atolls les plus proches des sites d'expérimentations et deux essais réalisés sur barge, l'un à Fangataufa (Rigel) l'autre à Mururoa (Sirius).

L'avis de zones dangereuses à la navigation maritime et aérienne a été diffusé dès le 15 mai aux navigateurs et dans les Publications d'informations aéronautiques (AIP). Ces zones ont été activées par messages AVURNAV et NOTAM six jours avant le premier essai. La navigation commerciale a respecté ces avis et les pêcheurs Japonais se sont tenus à l'écart de ces zones.

La volonté de protéger les atolls et îles habités de la Polynésie et en particulier les plus proches des sites d'expérimentations (Tureia-Gambier-Reao) de retombées significatives conduisit à attendre les conditions météorologiques les plus favorables à la dispersion du nuage radioactif. Les essais sur barge ont généralement donné lieu à de longues attentes (nommées Pénélope), avant que les conditions météorologiques soient réunies pour réaliser ces essais qui ont été accompagnés de retombées locales importantes au niveau du lagon. Malgré les précautions prises, l'archipel des îles Gambier, a été touché par les retombées de l'essai Aldébaran (cf. Chapitre VI), conduisant à une exposition de la population à un niveau de l'ordre de grandeur de la dose annuelle maximale admissible pour les populations (5 mSv), selon la réglementation française en vigueur jusqu'en 2001.

ALDÉBARAN Essai n° 1

Date de l'essai : 2 juillet 1966, 5h34 (heure locale)
Type d'essai : sur barge dans le lagon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 10 m
Énergie : 28 kt



Informations météorologiques

Le 1er juillet, les conditions météorologiques étaient favorables, avec des vents du sud-ouest faiblissant en soirée et remontant lentement vers le nord. Le 2 juillet, après réalisation de l'essai, l'orientation des vents évoluait défavorablement, soufflant d'ouest-nord-ouest.

Au moment de l'essai, la visibilité était bonne sur la zone.

Déroulement de l'essai

Le nuage s'est élevé verticalement au niveau du point zéro et l'influence du vent est apparue très nettement à partir de H+6min. Le nuage s'est alors incliné dans le lit du vent pour présenter, peu à peu, plusieurs parties distinctes dues aux cisaillements des vents. La partie inférieure du pied est restée visible à la verticale du point zéro, jusqu'à H+15min.

À H+1h, le nuage principal s'étendait sur 65 km, à une altitude moyenne de 6 500 m. Il était porté par des vents de 20 $m.s^{-1}$ venant du 280, conditions moyennes mesurées entre 5 000 et 9 000 m d'altitude. La vitesse moyenne des vents au sol atteignait 5 $m.s^{-1}$.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Le jour de l'essai, entre 16h20 et 17h40, une augmentation de la radioactivité atmosphérique a été détectée à Morane, l'atoll inhabité le plus proche à l'est de l'atoll de Mururoa, puis à Mangareva, la principale île de l'archipel des Gambier.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Les 13, 14 et 15 juillet, une faible remontée de l'activité volumique associée à l'indice bêta global entre 0,37 et 3,7 $Bq.m^{-3}$, a été détectée dans l'atmosphère de l'ensemble des îles appartenant au réseau de surveillance polynésien. Ces détections correspondaient à des retombées différées dans le temps. La valeur maximale de l'activité volumique associée à l'indice bêta global, 5,5 $Bq.m^{-3}$, a été atteinte à Puka Puka.

➞ Les détails de l'évaluation des conséquences radiologiques de l'essai Aldébaran pour la population et l'environnement des îles Gambier sont présentés dans le chapitre VI.

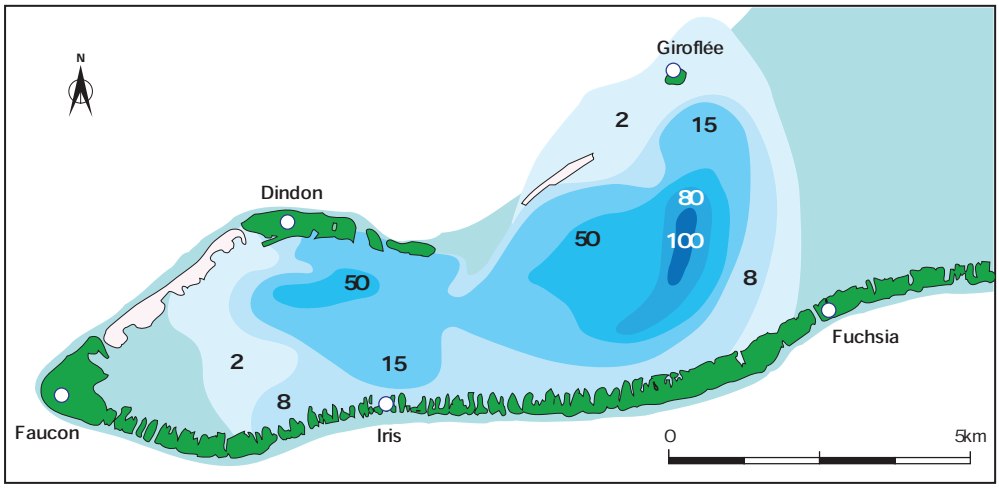


FIG. 208. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 m au-dessus des eaux de lagon dans le secteur Ouest de l'atoll de Mururoa à J+2 (vent du sud de 7 $m.s^{-1}$).

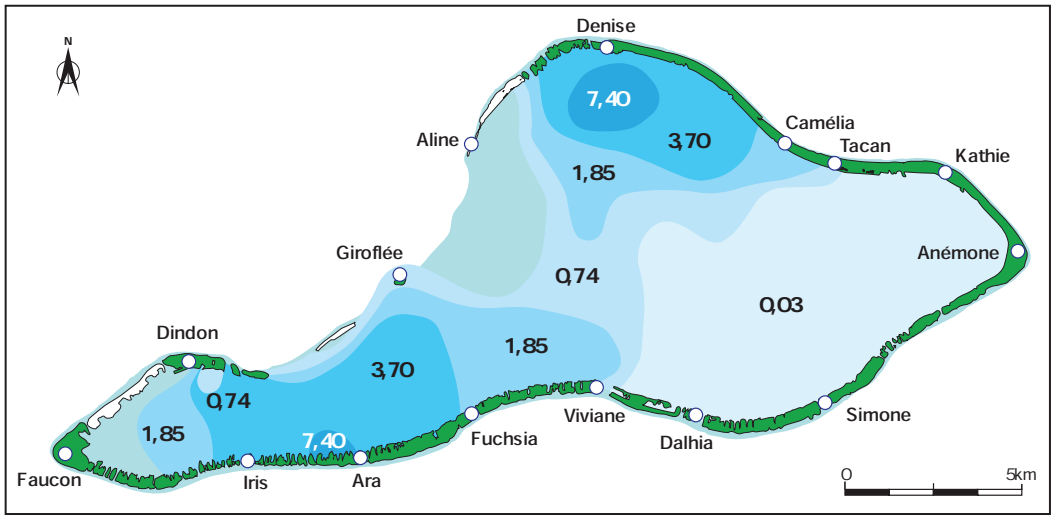


FIG. 209. - Activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux du lagon de Mururoa à J+8 (vent du 120 ; 6 $m.s^{-1}$).

TAMOURÉ Essai n° 2



Date de l'essai : 19 juillet 1966, 5h05 (heure locale)
Type d'essai : largage par avion Mirage IV
Site : à 85 km à l'est de Mururoa
Altitude : 1 000 m
Énergie : 50 kt

Informations météorologiques

Le 13 juillet 1966, les vents des basses couches de la troposphère étaient orientés au nord, puis au nord-ouest, très à l'avant d'une dépression qui se dirigeait lentement vers l'est. Les 17 et 18, une perturbation a atteint l'atoll de Mururoa. Les conditions météorologiques ont été favorables pendant quelques heures le 18, en fin de nuit, et le 19, en matinée. Une couche de stratocumulus était alors présente vers 1 200 m.

Informations sur l'essai

Le nuage s'est fragmenté rapidement puis, le nuage principal s'est allongé, s'étendant sur près de 150 milles nautiques 2 heures après l'essai.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

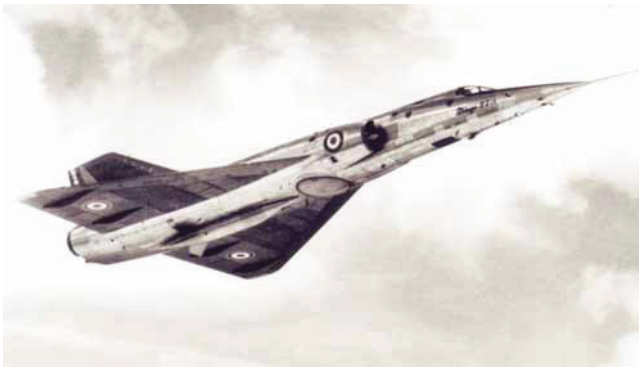
Le nuage principal s'est dirigé vers l'est en direction des atolls inhabités du Groupe Actéon. Au large de Mururoa, une tache correspondant à l'activation de l'eau de mer à l'aplomb du point zéro a été détectée jusqu'au 21 juillet, elle a ensuite disparu alors par décroissance radioactive et dilution.

Iles et atolls concernés par les retombées différées

Une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global a été détectée, à faible niveau, dans l'atmosphère de Papeete le 23 juillet, atteignant une valeur maximale de 0,074 $Bq.m^{-3}$. Cette augmentation correspondait aux retombées associées au passage d'un nuage dérivé.



Décollage d'un Mirage IV A de la piste de l'atoll d'Hao.



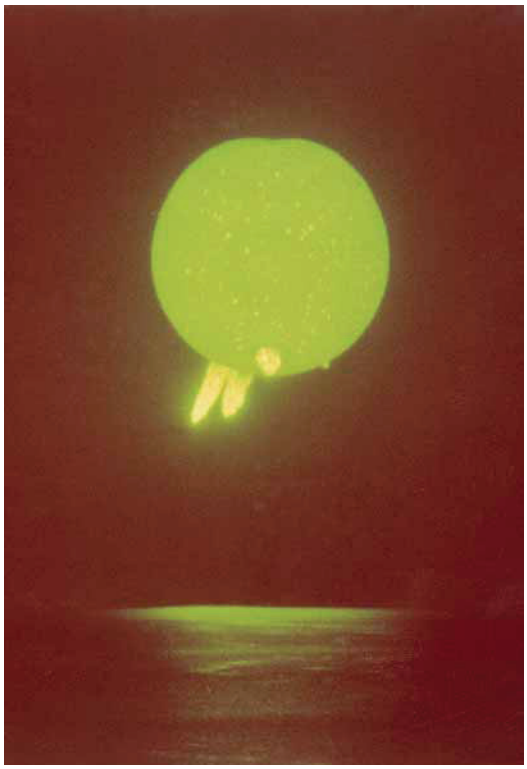
Mirage IV A en vol armé d'un engin nucléaire.



Équipage d'un Mirage IV A
au retour d'un vol d'entraînement.

BÉTELGEUSE Essai n° 3

Date de l'essai : 11 septembre 1966, 7h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 1 200 m
Énergie : 110 kt



Informations météorologiques

Le 9 septembre, l'atoll de Mururoa se trouvait à l'avant d'une dépression barométrique liée à une perturbation dont la partie active se trouvait plus au sud. Une baisse de la pression localisée au niveau de l'atoll s'est traduite par une perturbation active se développant rapidement. Celle-ci est restée stationnaire une partie de la nuit, son diamètre n'a pas excédé 50 milles nautiques. Les vents d'est à nord-est ont soufflé en rafales atteignant 40 nœuds jusqu'à la fin de la nuit. Le 10 septembre, la perturbation s'est atténuée en se déplaçant très lentement vers le sud-est, la dépression barométrique a repris son mouvement vers l'est et, le 11 septembre au matin, l'ensemble de la zone englobant le site d'expérimentations se trouvait dans un régime de sud-ouest, à toutes les altitudes. Le ciel était nuageux au voisinage du point zéro, mais la visibilité était bonne.

Informations sur l'essai

Le nuage s'est élevé verticalement au-dessus du point zéro sous la forme d'un champignon à la tête nettement plus grosse que le pied. Il s'est sensiblement incliné dans la direction du vent, à partir de H+5min. Dès H+7min, le pied s'est désagrégé et à H+8min, seul subsistait, en altitude, le nuage provenant de la tête du champignon initial. À H+15min, le nuage s'est allongé sur plusieurs dizaines de kilomètres. Deux heures après l'essai, il s'étendait sur une longueur de 200 km, à une altitude moyenne de 12 000 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global de l'ordre de 185 Bq.m^{-3} a été détectée, 4h15 après l'essai, dans l'atmosphère de Tureia. Les autres atolls et îles de Polynésie n'ont pas fait l'objet de retombées directes.

Iles et atolls concernés par les retombées différées

Le 20 septembre, l'activité volumique associée à l'indice bêta global a atteint une valeur de 0,3 Bq.m^{-3} dans l'atmosphère de Papeete.

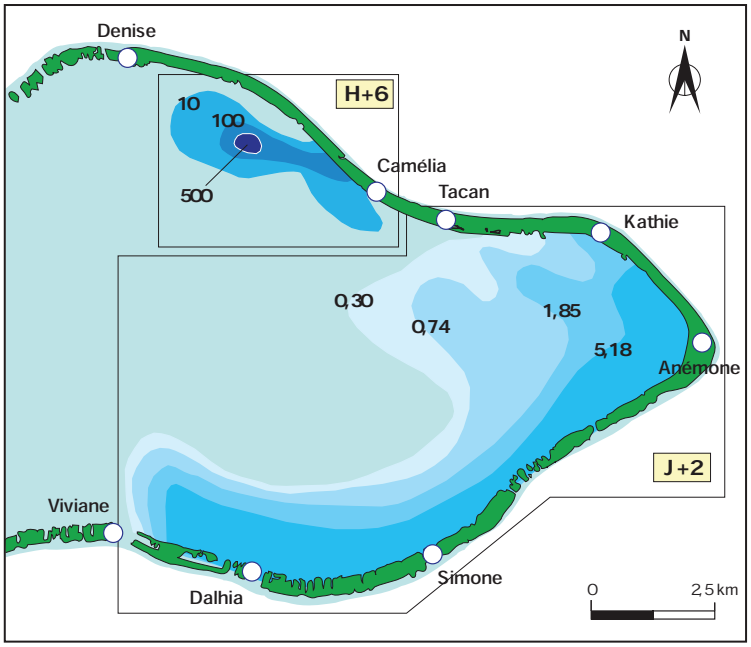


FIG. 210. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 m au-dessus des eaux du lagon à H+6 et activité volumique des eaux ($MBq.m^{-3}$) à J+2.

RIGEL Essai n° 4

Date de l'essai : 24 septembre 1966, 7h00 (heure locale)
Type de l'essai : sur barge dans le lagon
Site : Fangataufa – Zone Frégate
Altitude : 3 m
Énergie : 125 kt



Informations météorologiques

Le 21 septembre, les vents étaient favorables, au-dessus de 8 000 m d'altitude, mais ils soufflaient d'ouest-nord ouest aux altitudes inférieures, ce qui a entraîné trois reports successifs de l'essai. Le 22 septembre, les vents soufflaient d'ouest-nord-ouest en altitude, mais la marge de sécurité étant trop faible pour procéder à l'essai qui a été reporté une 4e fois. Le 23 septembre, un régime de sud-sud-est s'établissait dans les basses couches de l'atmosphère, se renforçait lentement et gagnait les couches supérieures. Le 24 septembre, ce régime de sud à sud-est, complété par des vents oscillant autour du secteur ouest au-dessus de 4 000 m, établissait des conditions météorologiques favorables à la réalisation de l'essai. Au moment de l'essai, la nébulosité en stratocumulus et cumulus était encore importante.

Informations sur l'essai

Au moment de l'essai, le régime des vents en fonction de l'altitude était décrit comme suit :

- entre 0 et 500 m d'altitude, le vent soufflait du sud-est (du 140°) à 5 $m.s^{-1}$;
- de 600 à 3 000 m d'altitude, les vents avaient des directions variables et des vitesses faibles ;
- de 3 000 m d'altitude jusqu'à la base de la stratosphère, les vents prédominants d'est ouest atteignaient une vitesse de 40 $m.s^{-1}$, le maximum de 50 $m.s^{-1}$ était atteint vers 12 000 m d'altitude.

Dans les 12 heures qui ont suivi l'essai, les masses d'air ont peu évolué, soumises essentiellement à l'effet diume, favorisant le maintien en suspension des aérosols par turbulence et leur dépôt pendant la nuit. Il y a été noté l'absence d'un front cohérent.

Îles et atolls habités concernés par les retombées immédiates

L'axe des retombées directes était orienté en direction de l'est, sur les atolls alors inhabités du Groupe Actéon, Maria, Marutea Sud et Matureivavao. Cependant, le retour de masses d'air contaminées au niveau des basses couches de l'atmosphère, a conduit à une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global, entre 11 et 13 heures après l'essai, dans l'atmosphère de Tureia et des îles Gambier atteignant un maximum de 355 $Bq.m^{-3}$ avec une augmentation de l'activité volumique des eaux de pluie.

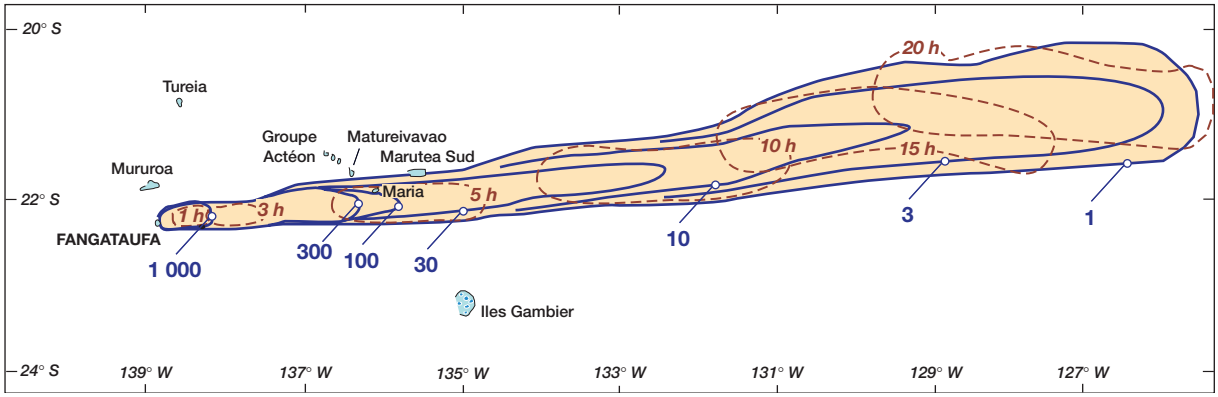


FIG. 211. - Évaluation des retombées proches après l'essai Rigel :
- Courbes des iso-débits de dose en $mGy.h^{-1}$ ramenées à H+1 et isochrones en heures après l'heure de l'essai.
- Tracés réalisés avec les vents réels observés après l'essai.

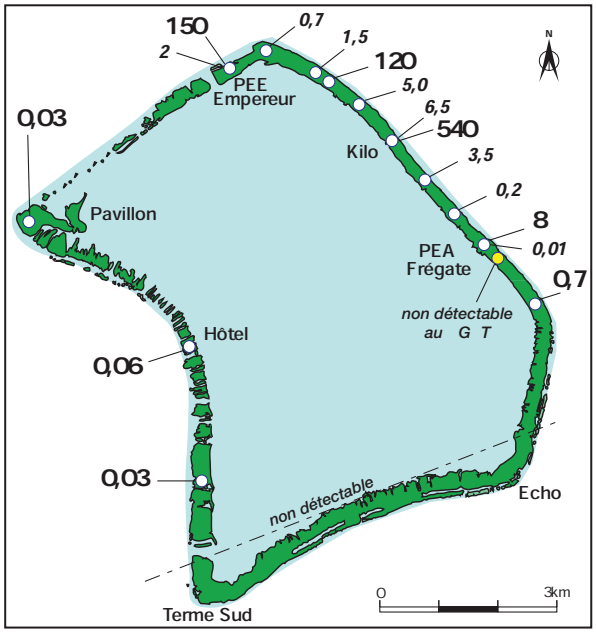


FIG. 212. - Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) mesurés à 1 m au-dessus du sol à H+7 par mission héliportée et *à J+15 le 09/10/66 (en italique).*

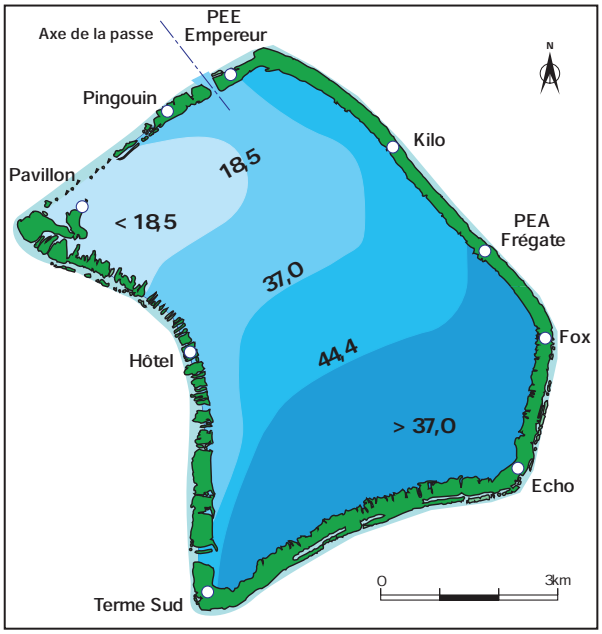


FIG. 213. - Activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux de lagon à Fangataufa à J+32.

→ Les détails de l'évaluation des conséquences radiologiques de l'essai Rigel pour la population et l'environnement de Tureia et des îles Gambier sont présentés dans le chapitre VI.

SIRIUS — Essai n° 5

Date de l'essai : 4 octobre 1966, 11h00 (heure locale)
Type d'essai : sur barge dans le lagon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 10 m
Énergie : 205 kt



Informations météorologiques

Le 4 octobre au matin, la rotation des vents à l'ouest-sud-ouest était effective à tous les niveaux. Le vent soufflait du 130 à 9 $m.s^{-1}$ dans les basses couches et du 280 à 26 $m.s^{-1}$, entre 5 000 et 9 000 m. L'essai a donc été réalisé à 11h, moment où la situation météorologique favorable était parfaitement établie.

Informations sur l'essai

Une très forte nébulosité couvrait les atolls d'expérimentations au moment de l'essai, gênant l'observation du nuage. La partie basse du pied est restée visible à la verticale du point zéro jusqu'à H+20min. Deux heures après l'essai, le nuage principal s'étendait sur une longueur de 180 km, à une altitude moyenne de 12 000 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Entre le 6 et le 7 octobre, des retombées de faible niveau ont été détectées par la remontée de l'activité volumique associée à l'indice bêta global de l'atmosphère atteignant une centaine de $Bq.m^{-3}$ dans l'air à Vairaatea, Makemo, Reao et Hao et quelques centaines à quelques milliers de $Bq.m^{-3}$ à Anaa, Hereheretue et Tahiti (Taravao).

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Entre le 9 et le 11 octobre, des retours anticycloniques ont entraîné des retombées plus tardives, de plus faible amplitude, sur l'ensemble de la Polynésie.

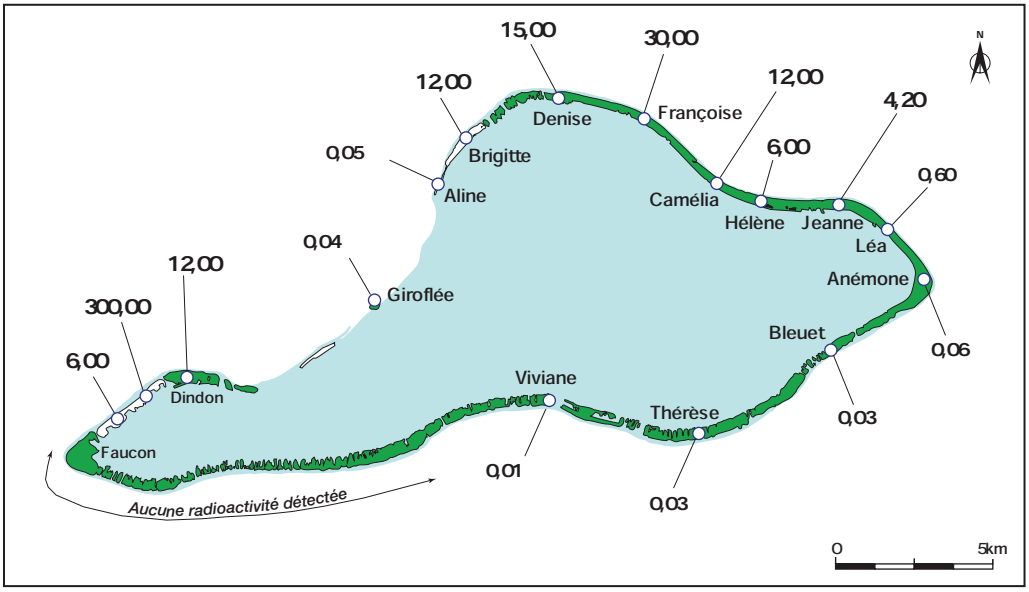


FIG. 214. - Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) à 1 m au-dessus du sol de l'atoll de Mururoa à H+3h30.

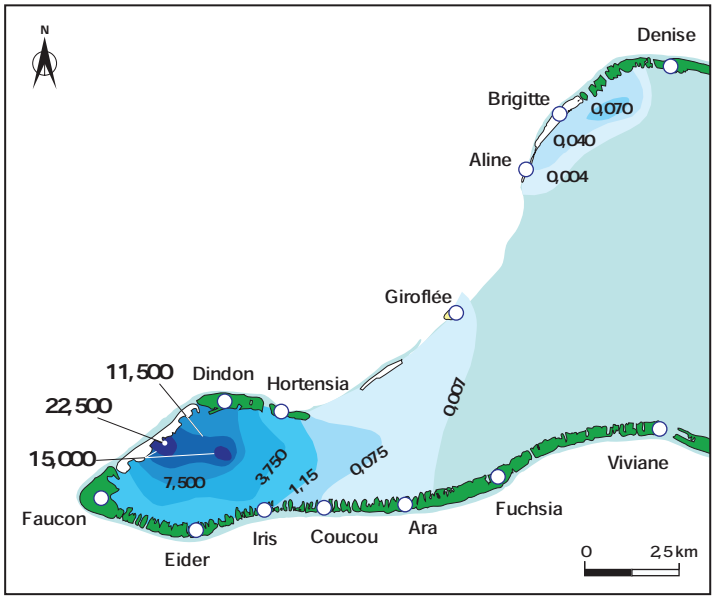


FIG. 215. - Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) à 1 m au-dessus de la surface des eaux du secteur Ouest du lagon de Mururoa 1 jour après l'essai.

CAMPAGNE 1967

À la fin de l'année 1966, la décision a été prise d'effectuer en 1967 une campagne limitée à trois essais, conduisant à réduire les moyens opérationnels sur zone. Ainsi, pendant les deux mois de campagne, l'effectif mensuel du CEP a été ramené de 17 000, dont 5 000 pour la force Alfa en 1966, à 12 400 personnes dont 3 100 personnels directement affectés.

La campagne 1967 a concerné trois essais atmosphériques, deux sous ballon et un sur barge (Arcturus). Ces trois essais d'engins de faible puissance ont été prévus sur l'atoll de Mururoa les 1er, 8 et 25 juin, en utilisant la technique du ballon porteur afin de réduire les retombées proches. Un exercice de répétition a été réalisé du 18 au 21 mai. Les essais ont été reportés aux 5, 25 juin et 2 juillet en raison de l'attente du "courant jet" à l'altitude de 10 000 mètres qui ne s'est installé solidement que fin juin début juillet et à la suite de la destruction le 23 juin du ballon prévu pour porter l'engin à tester qui a contraint à réaliser le dernier essai sur barge. Cet essai est le dernier réalisé avec cette technique au CEP.

Cette campagne a mis en évidence la vulnérabilité du ballon aux situations météorologiques défavorables lors de la phase de préparation de l'essai, nécessitant un effort particulier pour assurer sa protection lors du gonflage et de son transport vers le point zéro.

Le suivi des retombées sur l'ensemble de la Polynésie par le réseau de surveillance a permis de confirmer l'intérêt de réaliser les essais sous ballon, puisque les résultats de la surveillance radiologique ont montré que par rapport aux essais sur barge l'utilisation de cette technique limitait fortement les retombées radioactives, tant régionales que mondiales. Les retombées en Polynésie les plus importantes ont concerné l'atoll de Tureia, suite à l'essai sur barge Arcturus qui a conduit à une dose à la population inférieure à la dose annuelle maximale admissible pour les populations (cf. Chapitre VI).

L'avis de zone dangereuse maritime a été respecté par tous les bâtiments commerciaux. La goélette *US Machias* est restée au voisinage de Tematangi pour des travaux océanographiques, la zone dangereuse aérienne n'a été traversée que par les appareils Boeing C135 des États-Unis.

ALTAÏR — Essai n° 6

Date de l'essai : 5 juin 1967, 9h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 295 m
Énergie : 15 kt



Informations météorologiques

Le jour de l'essai, l'anticyclone au sol a été dévié au nord-nord-est de l'atoll de Mururoa par la dépression établie au sud du site d'expérimentations. Cette conjoncture a créé des vents de basses couches sur l'Est de la Polynésie, tournant du nord-ouest à l'ouest, en fonction de l'altitude.

Informations sur l'essai

Au moment de l'essai, le vent au sol venait de l'ouest-sud-ouest (250°), à 6 $m.s^{-1}$, le vent moyen entre 5 000 et 9 000 m passait plein ouest (266°), à 30 $m.s^{-1}$, sa vitesse était maximale à 10 700 m (260°) à 41 $m.s^{-1}$. Le sommet du nuage atteignait 11 000 m, sous la tropopause située à 17 000 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Aucun atoll ne se trouvait sur la trajectoire des retombées directes du nuage principal. Néanmoins, le jour du tir, les postes de contrôle radiologique de Mangareva et de Tureia ont détecté une montée de l'activité volumique atmosphérique associée à l'indice bêta global de l'ordre de 1 $Bq.m^{-3}$.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Les 13 et 14 juin, soit 8 jours après l'essai, suite à un net retour anticyclonique, l'ensemble des postes répartis sur les îles et atolls de la Polynésie ont détecté une augmentation de l'activité atmosphérique.

Le niveau maximum de l'activité volumique atmosphérique associée à l'indice bêta global atteignait 3 $Bq.m^{-3}$, à Rangiroa, et 1,5 $Bq.m^{-3}$ le 17 juin, aux autres postes de contrôle radiologique. Cette activité atmosphérique a été détectée jusqu'au 25 juin. Par la suite les retombées dues au nuage principal qui terminait sa première révolution autour de l'hémisphère Sud ont également été détectées.

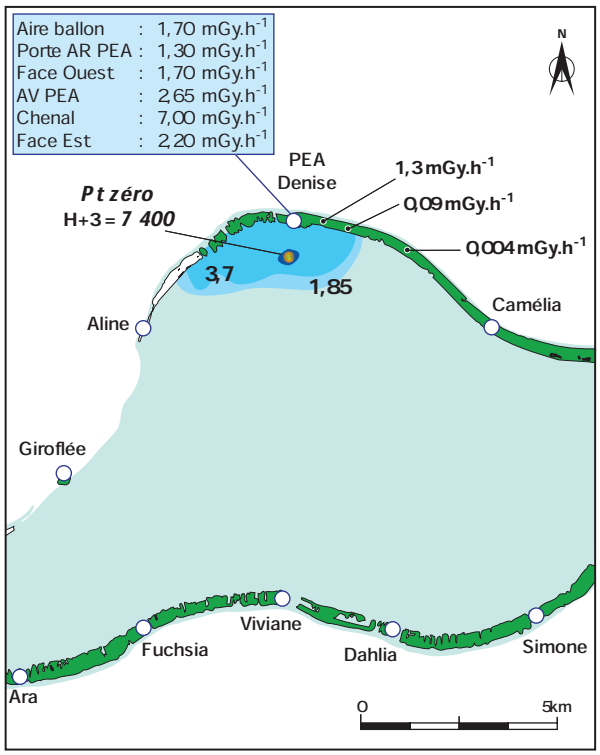


FIG. 216. - Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) au PEA Denise et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux du secteur Nord du lagon de Mururoa à H+7.

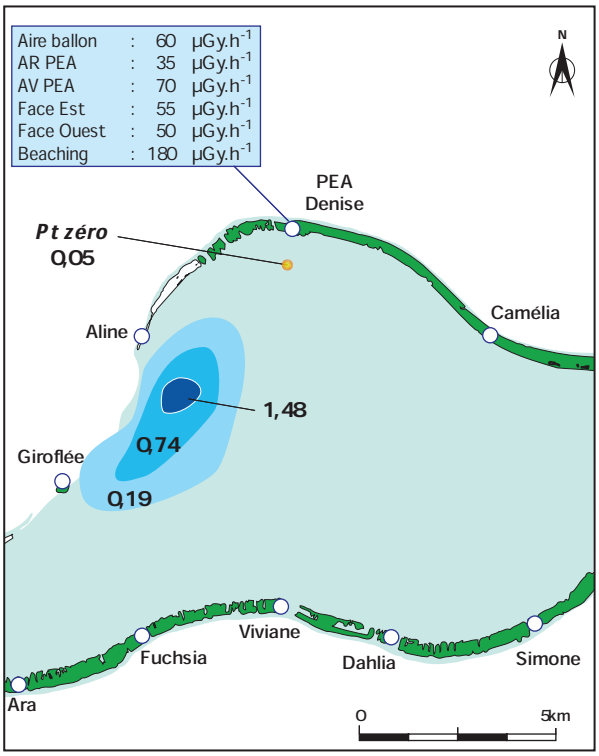


FIG. 217. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) au PEA Denise et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux du secteur Nord du lagon de Mururoa à J+3 (H+74).

ANTARÈS Essai n° 7

Date de l'essai : 27 juin 1967, 8h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 340 m
Énergie : 120 kt



Informations météorologiques

Le 27 juin, le noyau anticyclonique au sol était très proche au Sud de l'atoll de Mururoa, créant de 0 à 2 000 m des vents tournant du sud-est au nord-est, puis à l'ouest vers 5 000 m.

Informations sur l'essai

Au moment de l'essai, les vents au sol venaient du nord-nord-est (30°) à 5 $m.s^{-1}$. Entre 5 000 et 9 000 m, ils tournaient à l'ouest (260°) à 15 $m.s^{-1}$. Leur vitesse était maximale à 13 000 m d'altitude, au niveau de la tropopause, avec un vent de 31 $m.s^{-1}$ soufflant du 280°.

La base de la tête du nuage est montée à 12 000 m et le sommet à 25 000 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Compte tenu de la puissance et de l'altitude de l'essai, les retombées du pied ont été pratiquement inexistantes. Le nuage principal s'est bien orienté vers l'est, pour passer entre les îles Gambier et Reao.

Dans les premières vingt-quatre heures après l'essai, la situation créée par l'anticyclone dans les basses couches a entraîné une retombée atmosphérique de faible niveau sur les atolls de l'est polynésien. L'activité volumique associée à l'indice bêta global était de l'ordre du $Bq.m^{-3}$ à Mangareva, Tureia et Hao et atteignait 7,4 $Bq.m^{-3}$ sur l'atoll de Vairaatea.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Trois à cinq jours après l'essai, dans le prolongement des retombées précédentes, un retour anticyclonique a atteint le Nord-Ouest de la Polynésie. Une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global de l'atmosphère a été détectée par les postes de contrôle radiologique de Mahina, Bora Bora et Rangiroa, à des niveaux de l'ordre de quelques dixièmes de $Bq.m^{-3}$.

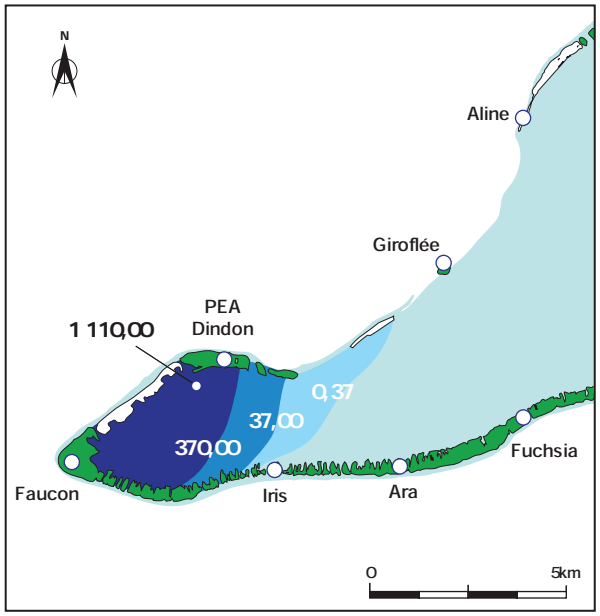


FIG. 218. - Activité volumique (MBq.m^{-3}) des eaux du lagon du secteur Ouest de l'atoll de Mururoa à H+7.

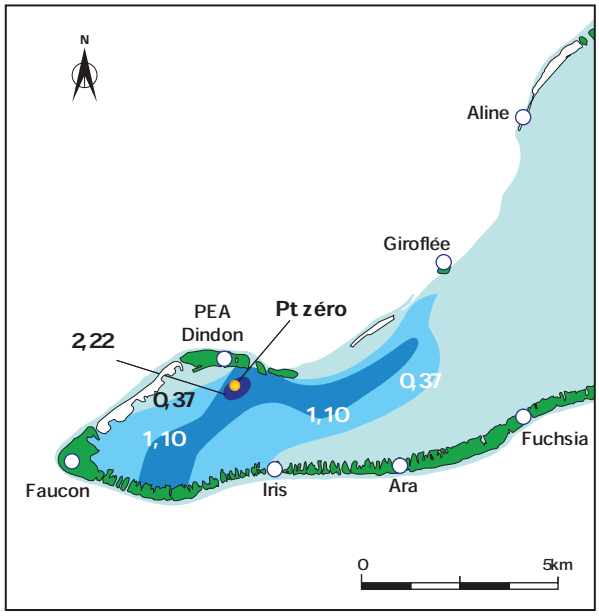


FIG. 219. - Activité volumique (KBq.m^{-3}) des eaux du lagon du secteur Ouest de l'atoll de Mururoa à J+4 (H+98).

ARCTURUS Essai n° 8

Date de l'essai : 2 juillet 1967, 7h30 (heure locale)
Type d'essai : sur barge, dans le lagon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 3 m
Énergie : 22 kt



Informations météorologiques

Le 2 juillet, le vent au sol venait du nord-nord-est (30°), à 6m.s^{-1}. Entre 5 000 et 9 000 m, il tournait à l'ouest-sud-ouest (250°) à 15m.s^{-1}. Sa vitesse maximale était située à 13 000 m (260°) à 31 m.s^{-1}.

Informations sur l'essai

La base du nuage a atteint 7 000 m, son sommet 15 000 m, sous la tropopause située à 15 200 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

La prévision de retombées, effectuée dans la nuit du jour J, établissait que le nuage principal passerait à une dizaine de kilomètres à l'est de l'atoll de Tureia. L'évolution des vents au moment de l'essai a dévié les masses d'air contaminées vers le nord-ouest et l'enveloppe du nuage a touché Tureia le 2 juillet, entre 16h et 19h.

Les habitants ont séjourné dans les abris de prévoyance pendant toute la durée de la mesure de l'augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global qui a été détectée jusqu'à Hao, à 0,74 Bq.m^{-3}.

➞ Les détails de l'évaluation des conséquences radiologiques l'essai Arcturus pour la population et l'environnement de Tureia de sont présentés dans le chapitre VI.

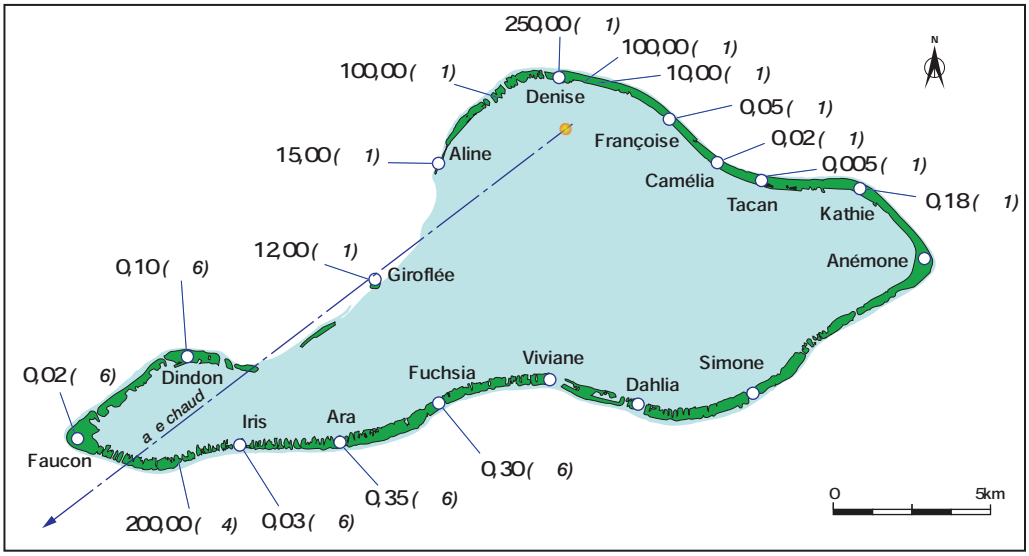


FIG. 220. - Débits de dose (mGy.h^{-1}) à 1 mètre au-dessus du sol de l'atoll de Mururoa de H+1 à J+4.

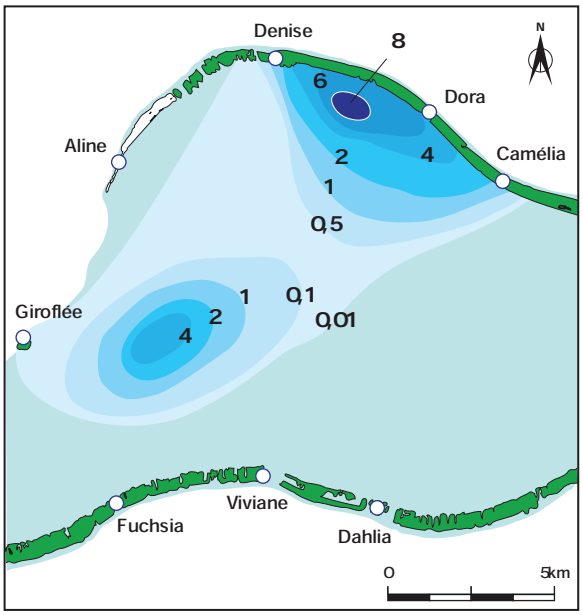


FIG. 221. - Débits de dose (mGy.h^{-1}) à 1 mètre au-dessus des eaux du lagon de l'atoll de Mururoa à H+28.

CAMPAGNE 1968

La campagne 1968 a concerné cinq essais atmosphériques, tous réalisés sous ballon. Cette campagne mettant en oeuvre les premiers essais d'engins mégatonniques testés par la France a nécessité la prise en compte de précautions supplémentaires en termes de sécurité à la lumière des enseignements tirés des campagnes précédentes qui avaient montré que :

- les conditions météorologiques les plus favorables à la réalisation des essais débutaient en juillet,
- les essais réalisés en altitude évitaient que la boule de feu ne vienne interagir avec la surface de l'eau du lagon (cf. Chapitre II),
- les essais étaient à réaliser par série avec un intervalle minimum de 4 jours entre deux essais afin de bénéficier du même créneau météorologique favorable,
- les essais de plus fortes puissances ne devaient pas être réalisés en zone Denise pour conserver la disponibilité du terrain d'aviation.

Les conditions météorologiques les plus favorables ont été attendues par les expérimentateurs pour les essais d'engins mégatonniques. Ainsi, le ballon a été monté à une altitude suffisante pour garantir, *a priori*, l'absence d'interaction de la boule de feu avec le lagon afin de limiter des retombées proches significatives. En effet, le rebond de l'onde de choc sur la surface du lagon empêchait l'interaction de la boule de feu en fin d'expansion avec les eaux du lagon, limitant ainsi les risques de retombées proches.

Par précaution, en prévision des essais d'engins mégatonniques, un effort particulier a été fait pour qu'en cas d'aléas météorologiques la protection des populations des îles habitées susceptibles d'être exposées : Tureia, les îles Gambier, Reao et Pukarua, soit assurée. Les moyens mis en place pour protéger les populations ont été réexaminés et l'organisation ainsi que les conditions d'une éventuelle évacuation soigneusement étudiées. De nouveaux abris ont été construits à Reao et Pukarua dans l'archipel des Gambier en remplacement des hangars gonflables appelés «tortues». Ils reposaient sur des murs en dur en partie basse pour protéger les occupants d'une éventuelle irradiation par des dépôts au sol au voisinage de l'abris. Un arrosage en pluie du toit pouvait être déclenché pour éviter l'accumulation des radionucléides et l'air y était renouvelé après filtration. Ils ont été conçus afin de pouvoir être éventuellement réutilisés par la population comme salle de cinéma ou hangar à coprah par exemple.

L'atoll de Tureia disposait, depuis la campagne de 1966, d'abris en béton de taille suffisante pour abriter l'ensemble de la population et des expérimentateurs en poste sur l'atoll. Par précaution, les habitants de Tureia, 60 personnes, ont séjourné à Tahiti pour le premier essai de forte puissance. La présence permanente sur l'atoll, d'une trentaine d'expérimentateurs a justifié le maintien des mesures de sécurité.

Les essais de forte puissance de cette campagne ont finalement engendré des retombées troposphériques très faibles.

CAPELLA — Essai n° 9

Date de l'essai : 7 juillet 1968, 12h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 463 m
Énergie : 115 kt



Informations météorologiques

Le 7 juillet, les vents au sol soufflaient de l'est, avec une vitesse de 20 nœuds. Vers 8 000 m, les vents se dirigeaient vers l'est en se renforçant de 13 à 15 $m.s^{-1}$. Au-dessus de 12 000 m, des vents forts (courant-jet de 36 $m.s^{-1}$) étaient dirigés vers l'est. Une première tropopause était présente à 12 600 m et une seconde vers 16 300 m.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé atteignait 16 700 m à H+6min, sa base était à 11 400 m d'altitude, pour un rayon de 6 100 m. Une couche de cirrus située entre 11 000 et 13 000 m masquait la tête du nuage.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Il n'y a pas eu de retombées directes d'un niveau significatif, mais une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global de l'atmosphère a été détectée à Tematangi, sur les atolls du Groupe Actéon, à Reao et à Totegegie dans l'archipel des Gambier. La valeur journalière maximale de 3 $Bq.m^{-3}$ a été mesurée à Raivavae pour la journée du 7 juillet.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Quelques retours anticycloniques ont entraîné une augmentation perceptible à bas niveaux de l'activité volumique associée à l'indice bêta global de l'atmosphère sur l'ensemble de la Polynésie.

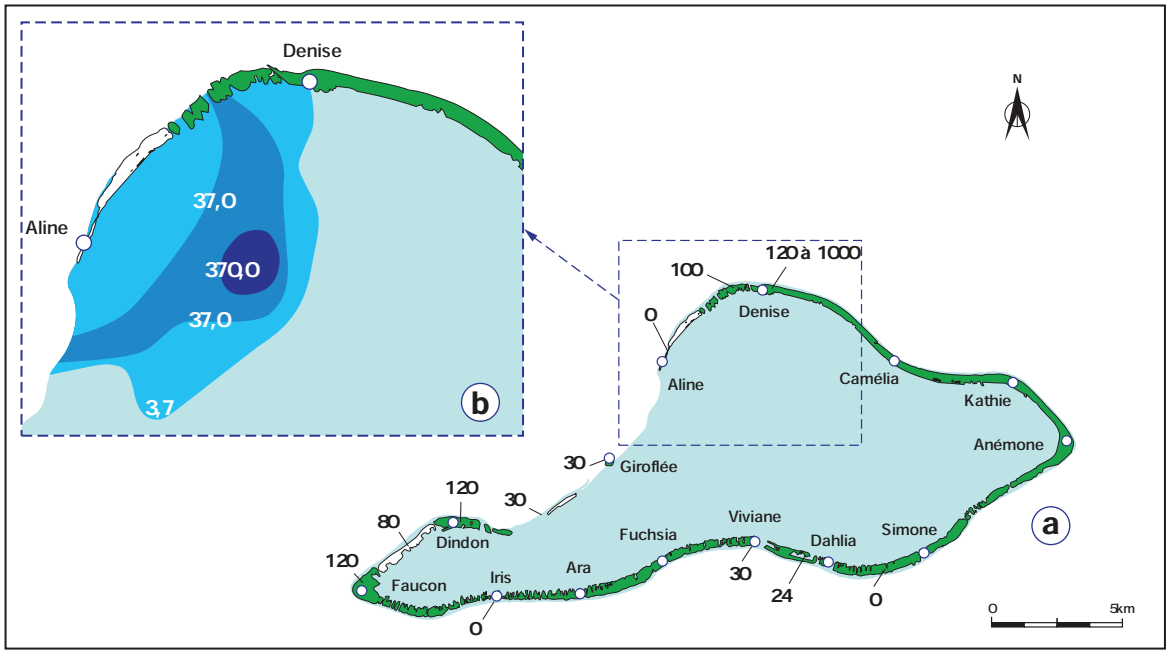


FIG. 222. - a : Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre au-dessus du sol de l'atoll de Mururoa à H+1h30.
b : Activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux de surface du secteur Nord du lagon de l'atoll de Mururoa à J+1.

CASTOR — Essai n° 10

Date de l'essai : 15 juillet 1968, 9h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa - Zone Dindon
Altitude : 650 m
Énergie : 450 kt



Informations météorologiques

Le 15 juillet, les vents, du sol jusqu'à 2 500 m, venaient de l'est, avec une vitesse faible de 3 à 5 $m.s^{-1}$. Vers 3 000 m, ils tournaient au secteur Sud, puis au sud-ouest en se renforçant jusqu'à atteindre 26 à 36 $m.s^{-1}$ à 12 000 m. Aux altitudes supérieures, vers 19 000 m, ils passaient à l'ouest nord-ouest.

Une tropopause polaire était présente à 12 500 m et une tropopause tropicale vers 16 000 m.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé atteignait 21 000 m, avec un rayon de 12 200 m à H+10min, sa base était à 14 800 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

La trajectoire des retombées était orientée vers le nord, les niveaux étaient faibles. L'activité volumique journalière associée à l'indice bêta global atmosphérique de l'ensemble des postes de contrôle radiologique de Polynésie est restée de l'ordre de 0,37 $Bq.m^{-3}$, avec des maxima atteignant 3 $Bq.m^{-3}$, à Tureia 5 heures après l'essai, et 6 $Bq.m^{-3}$, à Raivavae à 63 heures après l'essai.

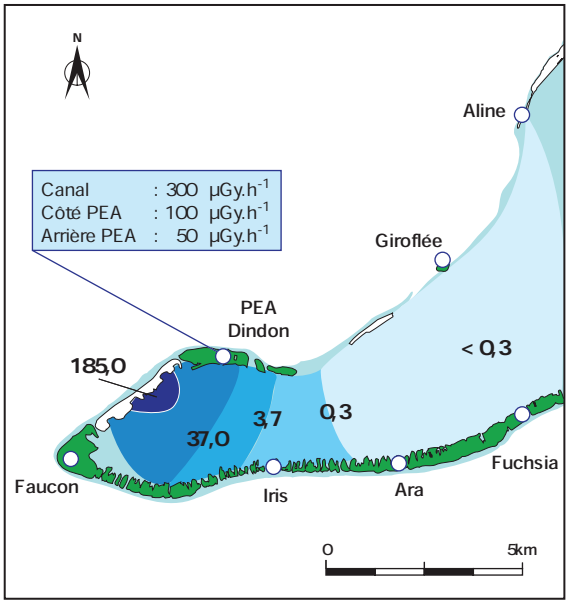


FIG. 223. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) au PEA Dindon et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux de surface du secteur Ouest du lagon de Mururoa à J+1.

POLLUX — Essai n° 11



Date de l'essai : 3 août 1968, 11h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 490 m
Énergie : 150 kt

Informations météorologiques

Le 3 août les vents au sol étaient faibles et venaient du nord à nord-ouest. Entre 1 500 et 5 000 m d'altitude, ils passaient à l'ouest-sud-ouest, leur vitesse étant comprise entre 5 et 10 nœuds. Aux altitudes supérieures, vers 14 000 m, des vents de sud-ouest atteignaient 26 m.s^{-1}. La tropopause tropicale était située vers 16 000 m d'altitude.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé à H+10min avait un rayon de 9 000 m et atteignait 17 600 m, tandis que sa base était à 10 400 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Cet essai n'a pas entraîné de retombées significatives. L'activité volumique atmosphérique de l'indice bêta global était de l'ordre de 0,37 Bq.m^{-3}. Des dépôts ont été détectés sur des bacs de prélèvement, avec des dépôts atteignant un maximum de 260 Bq.m^{-2} observés à Tureia et à Reao.

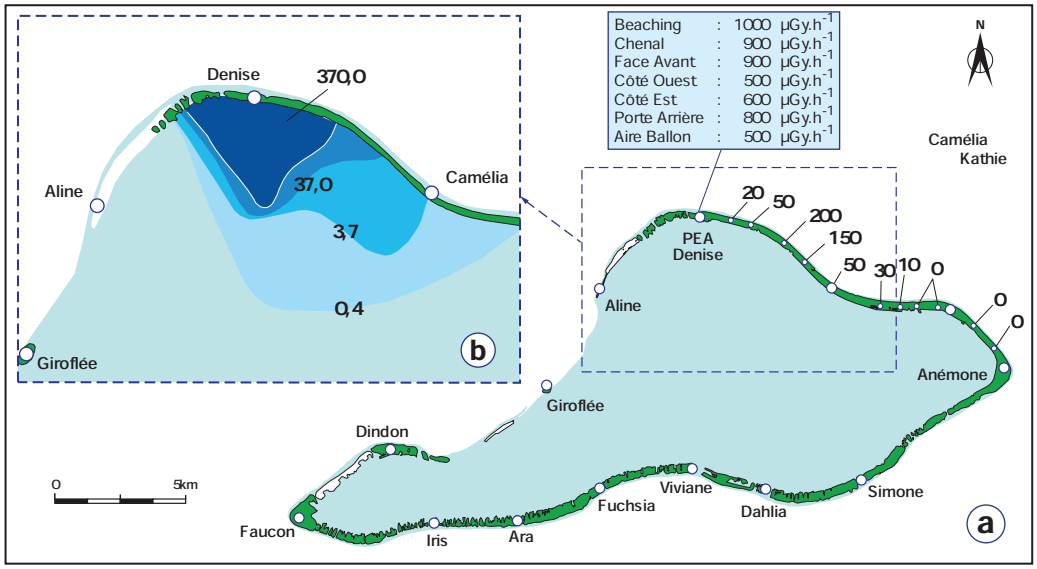


FIG. 224. - a : Débits de dose (µGy.h^{-1}) à 1 mètre au-dessus du sol de l'atoll de Mururoa à J (H+1h20 à H+5).
b : Activité volumique (MBq.m^{-3}) des eaux de surface du secteur Nord du lagon de l'atoll de Mururoa à J (H+4 à H+6h30)

CANOPUS Essai n° 12

Date de l'essai : 24 août 1968, 8h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Fangataufa – Zone Frégate
Altitude : 520 m
Énergie : 2,6 Mt (1er essai thermonucléaire)



Informations météorologiques

Le 24 août, les vents, du sol jusqu'à 1 500 m d'altitude, venaient du nord-nord-ouest avec une faible vitesse de 3 à 5 $m.s^{-1}$. Entre 1 500 et 3 000 m, le vent était faible, d'ouest, tournant au sud-ouest. De 3 000 m à 19 000 m, les vents du sud-ouest se renforçaient, atteignant 23 $m.s^{-1}$, à 15 000 m d'altitude. La tropopause était située à 15 500 m d'altitude.

Informations sur l'essai

À la stabilisation à H+10min, la tête du nuage atteignait 24 000 m d'altitude, sa base 14 800 m et son rayon était de 21 600 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

La trajectoire des retombées s'est orientée en direction du nord-est. Les 24 et 25 août une augmentation de l'activité volumique atmosphérique de l'indice bêta global a été détectée à Tureia avec 2,6 $Bq.m^{-3}$, 16 heures après l'essai, puis à Pukarua et Reao avec 10 $Bq.m^{-3}$, le 25 août à 8H30.

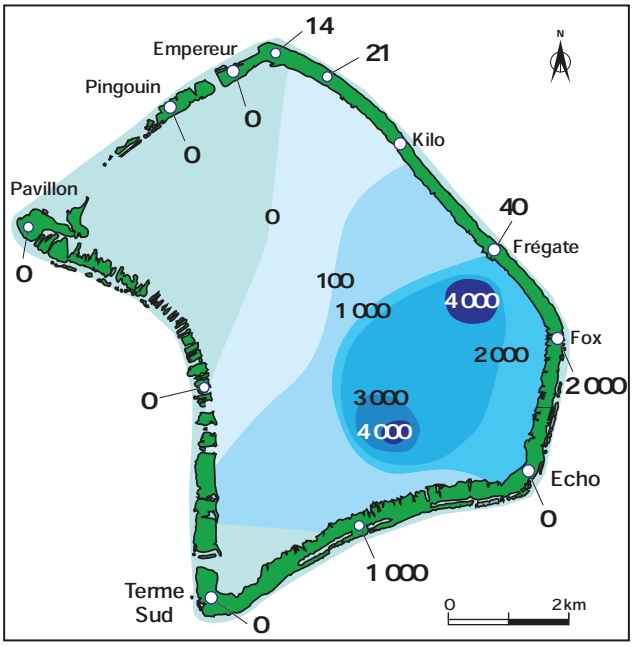


FIG. 225. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre au-dessus :
- du sol de l'atoll de Fangataufa entre H+2 et H+3h30 ;
- de la surface de l'eau du lagon de Fangataufa à H+8h30.

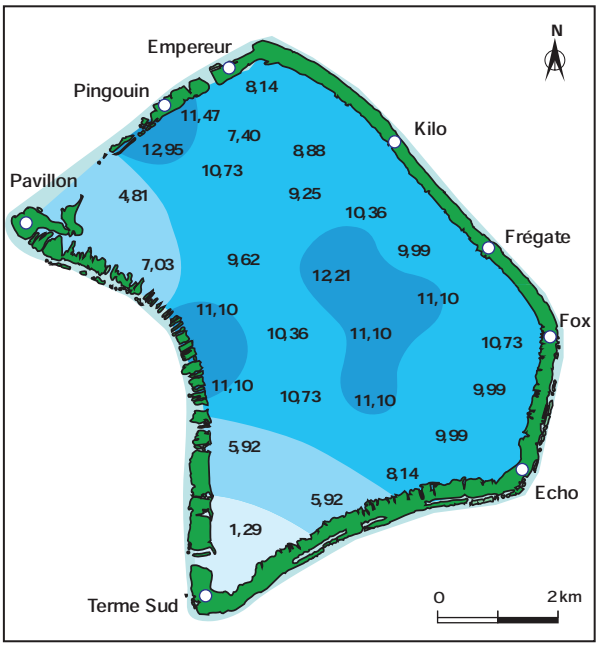


FIG. 226. - Activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux de surface du lagon de l'atoll de Fangataufa à J+4 (07h30 à 11h00).

PROCYON — Essai n° 13

Date de l'essai : 8 septembre 1968, 9h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 700 m
Énergie : 1,28 Mt



Informations météorologiques

Les vents au sol étaient de secteur est et de faible vitesse, de 3 à 6 $m.s^{-1}$. Ils ont ensuite tourné par le nord pour s'orienter au sud-ouest. En altitude, de 3 500 m à 13 000 m, les vents de sud-ouest se sont renforcés pour atteindre 36 $m.s^{-1}$. De 13 000 m à 20 000 m, les vents du sud-ouest ont faibli, jusqu'à atteindre 3 $m.s^{-1}$ à 20 000 m. La tropopause était située à 15 300 m.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé a atteint 24 000 m d'altitude, sa base 15 500 m et son rayon était de 20 000 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

La trajectoire des retombées a suivi un axe nord-est. Les niveaux de l'activité volumique associée à l'indice bêta global sont restés du même ordre que ceux mesurés avant l'essai, soit quelques dixièmes de $Bq.m^{-3}$.

Iles et atolls concernés par les retombées différées

Des masses d'air contaminées ont été détectées sur l'ensemble de la Polynésie entre 17 et 48 jours après l'essai, avec une activité volumique moyenne associée à l'indice bêta global de l'ordre de quelques dizaines de $mBq.m^{-3}$.

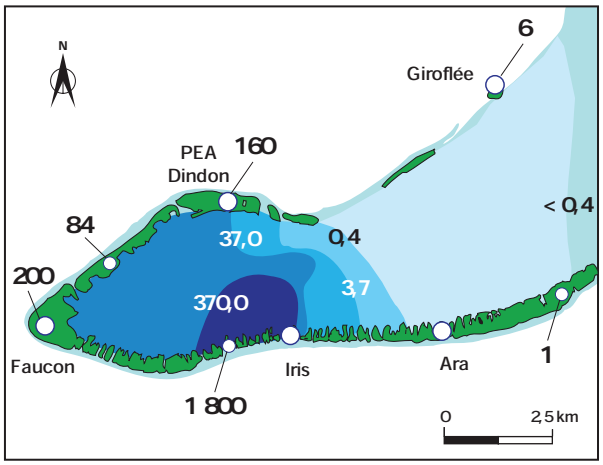


FIG. 227. - Activité volumique (MBq.m^{-3}) des eaux de surface du secteur Ouest du lagon de l'atoll de Mururoa à H+4 à H+7 et débit de dose (µGy.h^{-1}) des parties terrestres à H+1h30.

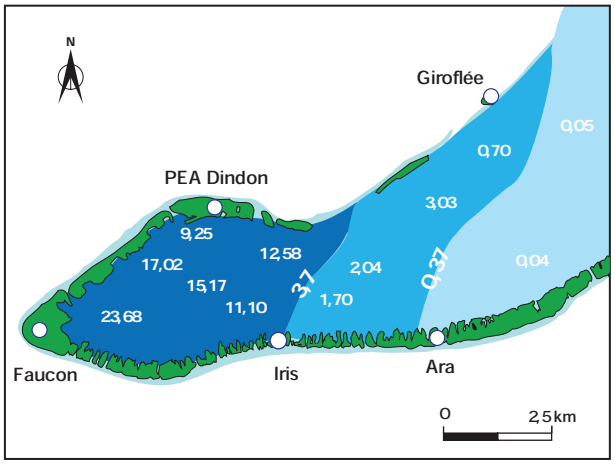


FIG. 228. - Activité volumique (MBq.m^{-3}) des eaux de surface du secteur Ouest du lagon de l'atoll de Mururoa à J+3.

CAMPAGNE 1970

Aucun essai n'a été programmé en 1969, ce qui a permis d'analyser le détail des résultats scientifiques et techniques acquis lors de la campagne thermonucléaire de 1968 et de les mettre à profit pour l'étude et la réalisation de nombreux engins expérimentaux qui ont entraîné une campagne 1970 particulièrement dense en nombre d'essais. La campagne 1970 a comemé huit essais atmosphériques, tous sous ballon. L'importance du nombre d'essais a imposé un début de campagne dès la mi-mai. La maîtrise acquise pour la mise en œuvre des ballons a permis d'être prêt lorsque les conditions météorologiques étaient favorables. L'absence de porte-avions a conduit à constituer deux groupes de Super Frelon, l'un sur l'*Orage*, l'autre sur l'atoll de Tureia pour récupérer les fusées de collecte des aérosols.

Des modifications rapides des conditions météorologiques ont entraîné une contamination localisée sur les atolls d'expérimentations à la suite de cinq des huit essais. Le libre accès à certaines zones de l'atoll de Mururoa a donc dû être différé de quelques jours à une semaine suivant les essais. L'absence de contamination significative du lagon a permis d'assurer le retour des bateaux dans le lagon dès l'après-midi de chaque essai et d'abandonner le dispositif de pompage extérieur pour l'alimentation des bouilleurs des navires.

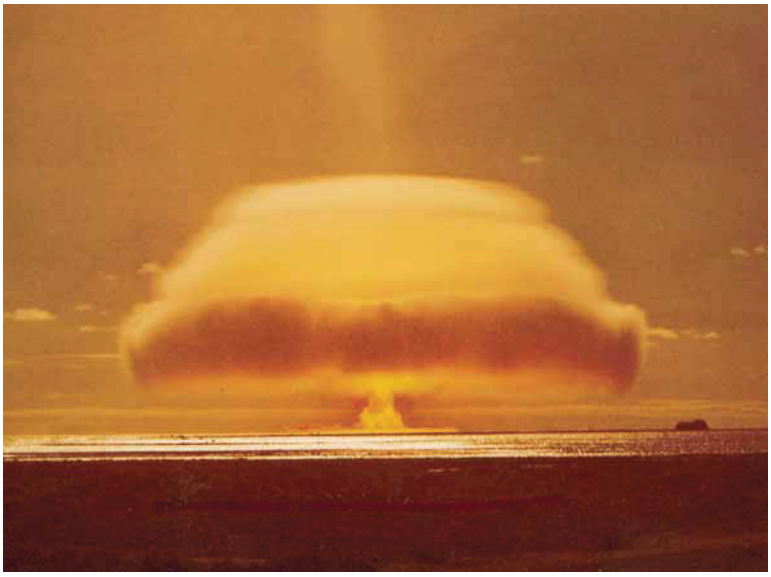
En Polynésie, les retombées ont été d'un faible niveau. Les couples altitude-énergie retenus pour la réalisation des essais de cette campagne ont réduit considérablement les risques pour les habitants des îles riveraines et la navigation maritime. La courbe d'isodose de «10 Gy/h à H+1» n'a atteint que très rarement les zones situées à plus de soixante milles nautiques du point zéro. L'évaluation de la dose exteme reçue dans l'année par la population des atolls et îles proches des sites d'expérimentations montre que le maximum a été de l'ordre de quelques pourcents de la dose maximale admissible annuellement pour les populations (cf. Chapitre VI). Les retombées les plus significatives ont été observées, après l'essai Dragon, à Tureia (0,12 mSv) et après l'essai Toucan, à Reao et aux îles Gambier avec respectivement 0,12 et 0,10 mSv, soit environ 2 % de la dose maximale admissible.

Les expérimentateurs ont été attentifs au risque de contamination des avions commerciaux susceptibles de rencontrer des masses d'air radioactives à leur altitude de vol. Compte tenu de la mise en service de Boeing 707 volant à une altitude de 9 000 à 10 000 m, altitude moins favorable que celle correspondant aux DC6 utilisés précédemment, le risque de contamination des avions pouvait subsister pendant plusieurs jours. L'appréciation de ce risque était effectuée par une équipe spécifique du SMSR positionnée au centre de la météorologie de Faaa. Le dispositif a parfaitement fonctionné et a conduit aux reports de deux essais ainsi qu'à des modifications de l'itinéraire des vols de la compagnie aérienne Lan Chile dont la ligne Santiago-Île de Pâques-Papeete passait dans la zone dangereuse aérienne une fois par semaine, dans chaque sens.

La fermeture du site de Fangataufa à l'issue de la campagne de 1970 a conduit à une économie de moyens et une simplification des activités opérationnelles. Elle a permis en particulier de supprimer la mission du *bâtiment base Morvan* qui arrivait à échéance de grand carénage et dont la poursuite du service nécessitait une opération de maintenance coûteuse.

ANDROMÈDE Essai n° 14

Date de l'essai : 15 mai 1970, 10h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa - Zone Denise
Altitude : 560 m
Énergie : 13 kt



Informations météorologiques

Le 15 mai, la situation météorologique locale se caractérisait par des vents au sol du sud-est de faible intensité, de 2 à 4 nœuds. En altitude, les vents passaient successivement du sud-ouest au nord nord-ouest avec une vitesse de 4 à 12 $m.s^{-1}$, à 12 $m.s^{-1}$ du 240 à 6 000 m, à 12 $m.s^{-1}$ du 270 à 7 000 m, à 9 $m.s^{-1}$ du 290 à 8 000 m d'altitude. Au moment de l'essai, le ciel était peu nuageux, la visibilité était bonne. La tropopause était située à 14 700 m d'altitude.

Informations sur l'essai

La base du nuage stabilisé à H+6min se situait à une altitude de 7 500 m, son sommet à environ 10 000 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Le 15 mai, à Tureia, l'activité volumique atmosphérique journalière moyenne associée à l'indice bêta global était de 0,37 $Bq.m^{-3}$. Le 17 mai, 0,74 $Bq.m^{-3}$ et 1 $Bq.m^{-3}$ ont été mesurés respectivement dans l'atmosphère de Reao et de Pukarua.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Des retombées différées ont été mesurées à Reao le 18 mai, à Pukarua le 19, à Tureia et à Puka Puka le 20, aux îles Marquises, à Hao et aux îles Gambier le 23, à Tahiti et aux îles Australes les 29 et 30. L'activité volumique atmosphérique associée à l'indice bêta global était de l'ordre de quelques dixièmes de Bq.m^{-3}.

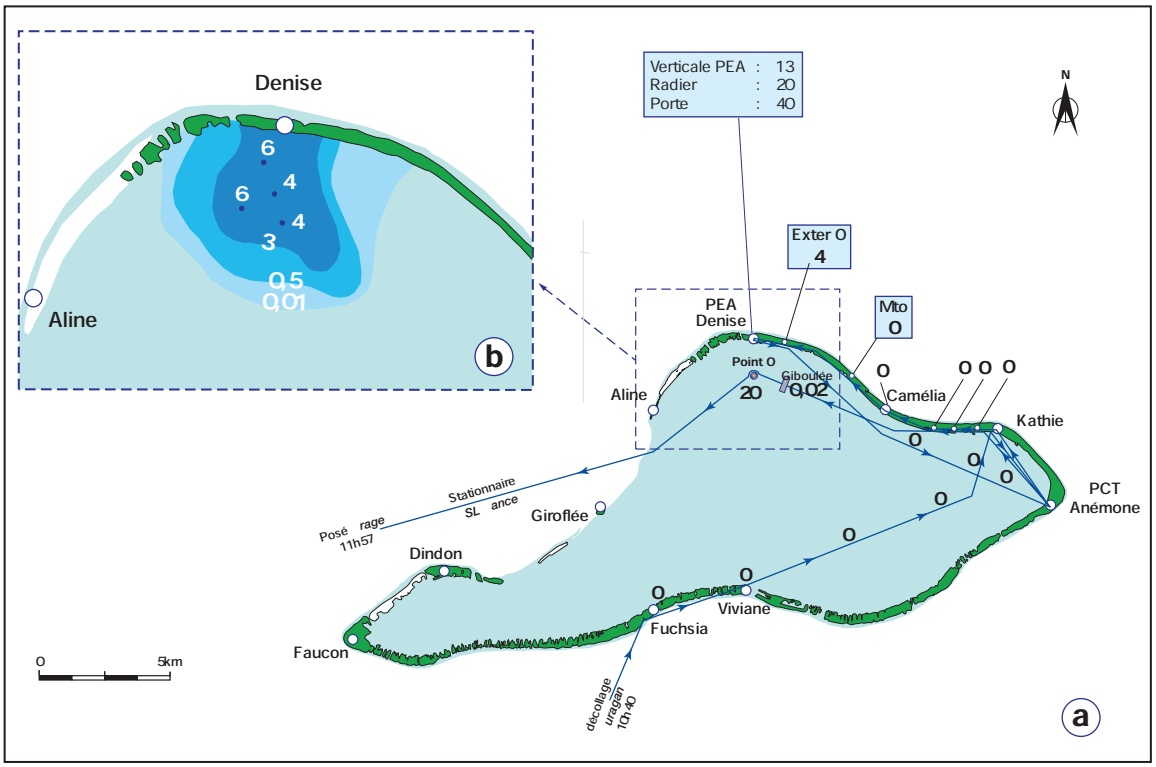


FIG. 229. - a : Débits de dose (mGy.h^{-1}) à 1 mètre au-dessus du sol de l'atoll de Mururoa à H+0h40 à H+1h57 (mission RAD 1).
b : Débits de dose (mGy.h^{-1}) à 1 mètre au-dessus des eaux du lagon du secteur Nord de l'atoll de Mururoa à H+3h40 à H+7h30 (mission LCPS).

CASSIOPÉE Essai n° 15

Date de l'essai : 22 mai 1970 à 10h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa - Zone Dindon
Altitude : 500 m
Énergie : 224 kt



Informations météorologiques

Initialement prévu le 20 mai, l'essai a été différé en raison de mauvaises conditions météorologiques, notamment de fortes rafales de vent à plus de 40 nœuds dans la soirée. Le 22 mai, les vents au sol soufflaient d'est avec des vitesses de 6 à 9 $m.s^{-1}$. Au-dessus de 3 000 m d'altitude, ils tournaient au nord puis, à l'ouest-nord-ouest, et atteignaient 30 $m.s^{-1}$ entre 9 000 m et 12 000 m, pour décroître jusqu'à 10 $m.s^{-1}$ à 16 000 m d'altitude.

Au moment de l'essai, les conditions de visibilité étaient médiocres avec de nombreux grains et un plafond bas. La tropopause était située à une altitude de 14 700 m d'altitude.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé à H+6min atteignait 17 000 m, tandis que sa base était à 13 500 m d'altitude.

Îles et atolls habités concernés par les retombées immédiates

Aucune retombée directe n'a été mise en évidence.

Îles et atolls habités concernés par les retombées différées

Des retombées différées ont été détectées. Des augmentations de l'activité volumique associée à l'indice bêta global ont été mesurées le 28 mai avec 0,037 $Bq.m^{-3}$ à Hiva Oa, les 30 et 31 mai avec 0,07 à 0,1 $Bq.m^{-3}$ à Tahiti, le 1er juin avec 0,1 $Bq.m^{-3}$ à Puka Puka et le 2 juin avec 0,74 et 0,15 $Bq.m^{-3}$, respectivement à Hao et Tureia.

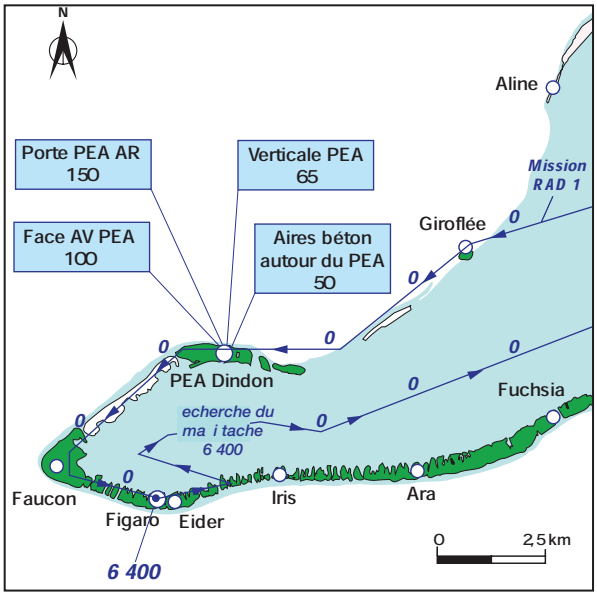


FIG. 230. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre au-dessus du sol du secteur Ouest de l'atoll de Mururoa entre H+42min et H+1h50.

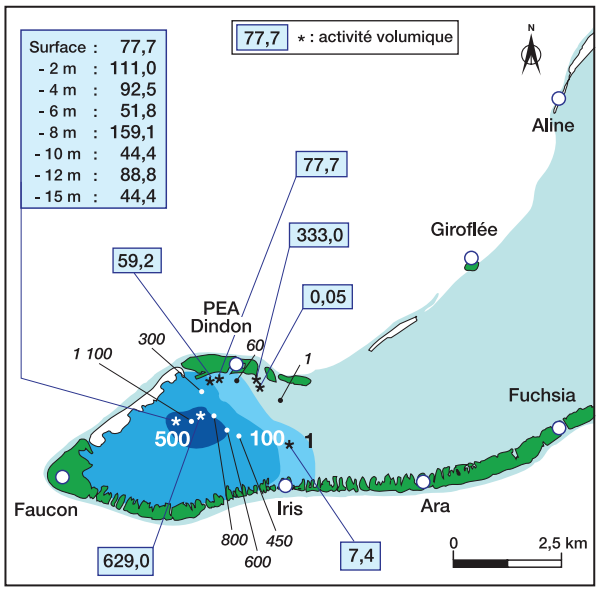


FIG. 231. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre au-dessus de la surface et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux de surface et sur un profil vertical jusqu'à -15 m de profondeur dans le secteur Ouest du lagon de Mururoa entre H+5h30 et H+8.

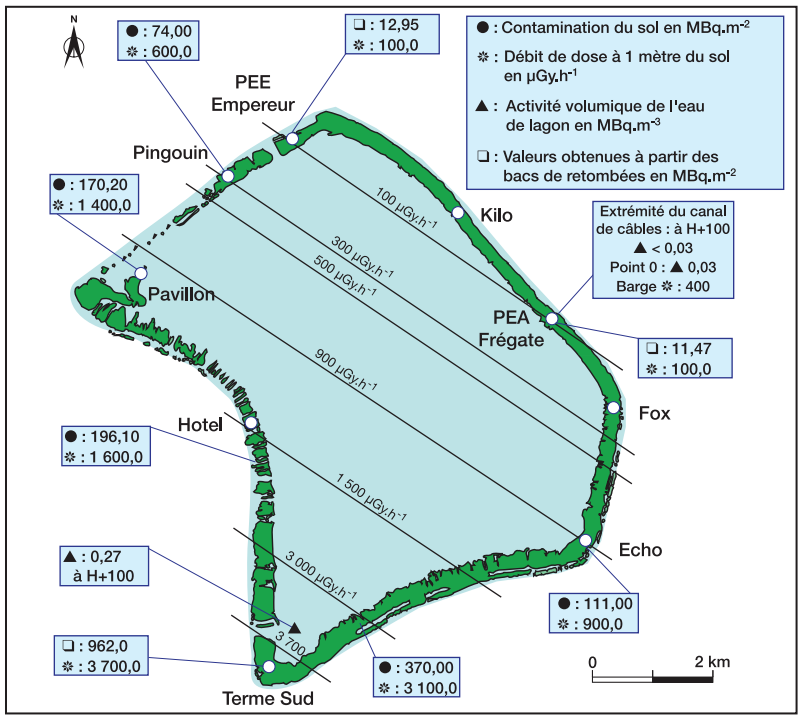


FIG. 232. - Valeurs des débits de dose et d'iso-débits de dose à 1 m au-dessus de la surface du sol et des eaux ($\mu Gy.h^{-1}$), de la contamination surfacique ($MBq.m^{-2}$) et des activités volumiques ($MBq.m^{-3}$) des eaux du lagon de l'atoll de Fangataufa ramenées à H+1.

DRAGON Essai n° 16

Date de l'essai : 30 mai 1970, 10h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Fangataufa – Zone Frégate
Altitude : 500 m
Énergie : 945 kt



Informations météorologiques

Le 30 mai, un premier anticyclone côtoyait le site d'expérimentations, au sud-est, et un second était centré au nord-est de la Nouvelle-Zélande. Les vents étaient faibles à toutes les altitudes. Ils étaient d'est de 5 à 10 $m.s^{-1}$, jusqu'à 2 000 m d'altitude ; du sud jusqu'à 7 000 m, et tournaient au sud-ouest à 9 000 m, avec une vitesse de 5 $m.s^{-1}$. Entre 12 000 et 18 000 m, ils s'orientaient successivement d'ouest sud-ouest à ouest-nord-ouest, passant par une vitesse maximale de 20 $m.s^{-1}$ à 15 000 m. À 21 000 m, ils étaient d'est-nord-est et très faibles, de l'ordre de quelques $m.s^{-1}$.

Au moment de l'essai, le ciel était peu nuageux avec de petits cumulus et la visibilité était excellente. La tropopause était située à une altitude de 13 200 m.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé à H+6min atteignait 21 000 m d'altitude et sa base 15 000 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Le 30 mai vers 19h50, des retombées ont été détectées sur Tureia, pendant environ 3 heures. L'activité volumique atmosphérique associée à l'indice bêta global atteignait alors 11 $Bq.m^{-3}$, avec une moyenne journalière de 1,6 $Bq.m^{-3}$. Le 31 mai vers 13h00, le débit de dose augmentait suite à des précipitations,

Le 1er juin, à 11h15, le poste de contrôle radiologique d'Hao détectait une retombée qui a pris fin le 3 juin. Cet épisode coïncide avec la détection du retour des masses d'air contaminées lors de l'essai d'Andromède. Le niveau maximal d'activité volumique atmosphérique a été atteint le 2 juin avec 0,74 $Bq.m^{-3}$.

Le 1er juin, l'activité volumique atmosphérique journalière était de 0,26 $Bq.m^{-3}$ sur l'île de Rapa et de 0,037 $Bq.m^{-3}$ à Pukarua. Le 3 juin, elle était de 0,18 $Bq.m^{-3}$ à Tahiti.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Les 6 et 14 juin, le passage des masses d'air contaminées a été détecté à Puka Puka, Hiva Oa, Tahiti, Hao, Reao, Tureia et l'archipel des Gambier, les *maxima* de l'activité volumique atmosphérique journalière moyenne étaient compris entre 0,0185 et 0.148 Bq.m^{-3}.

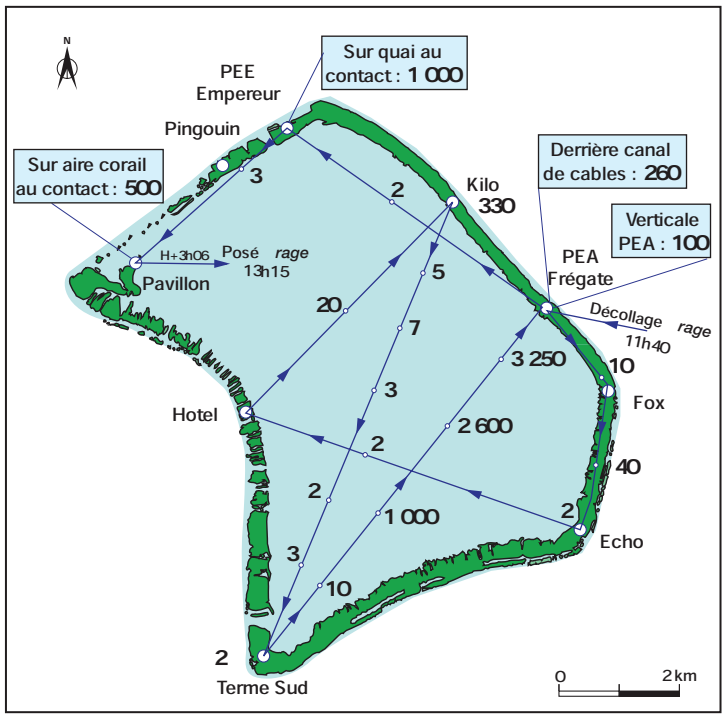


FIG. 233. - Débits de dose (µGy.h^{-1}) à 1 mètre au-dessus de la surface du sol et des eaux du lagon de l'atoll de Fangataufa entre H+1h40 et H+3h15 (mission RAD 2).

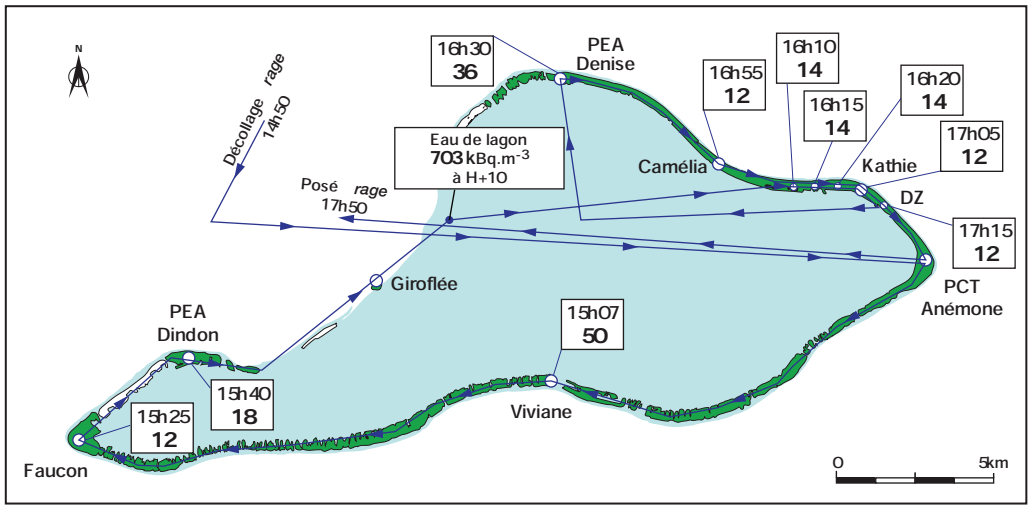


FIG. 234. - Débits de dose (µGy.h^{-1}) à 1mètre au-dessus du sol de Mururoa entre H+4h50 et H+7h50 (mission RAD 3).

ÉRIDAN — Essai n° 17

Date de l'essai : 24 juin 1970, 10h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – zone Denise
Altitude : 560 m
Énergie : 12 kt



Informations météorologiques

Le 24 juin, un front froid est passé à Tematangi, Mururoa puis Tureia, respectivement vers H+2h, H+11h et H+24h. Les vents soufflaient de nord-ouest dans les basses couches à 5 nœuds au niveau du sol, tournaient avec l'altitude à l'ouest-nord-ouest, puis à l'ouest entre 5 000 et 6 000 m. Ils revenaient au nord-ouest à 8 000 m, puis à l'ouest vers 11 000 m. Les vitesses ne dépassaient pas 15 à 20 nœuds. La tropopause était située à 15 000 m.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé, à H+6min, se situait à 2 000 m d'altitude et sa base à 8 500 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Le 25 juin à 01h00, une augmentation de l'activité atmosphérique a été détectée aux îles Gambier avec une activité volumique journalière moyenne associée à l'indice bêta global de 5,5 $Bq.m^{-3}$.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Des retours anticycloniques ont été détectés le 6 juillet sur les Tuamotu et les Marquises et à Tahiti, le 9 juillet. Les valeurs maximales d'activité volumique mesurées étaient de 1,25 $Bq.m^{-3}$ à Reao, 0,27 $Bq.m^{-3}$ à Tureia, 0,17 $Bq.m^{-3}$ aux Gambier, 0,48 $Bq.m^{-3}$ à Hao, 0,37 $Bq.m^{-3}$ à Hiva Oa, 0,48 $Bq.m^{-3}$ à Puka Puka et 0,26 $Bq.m^{-3}$ à Papeete.

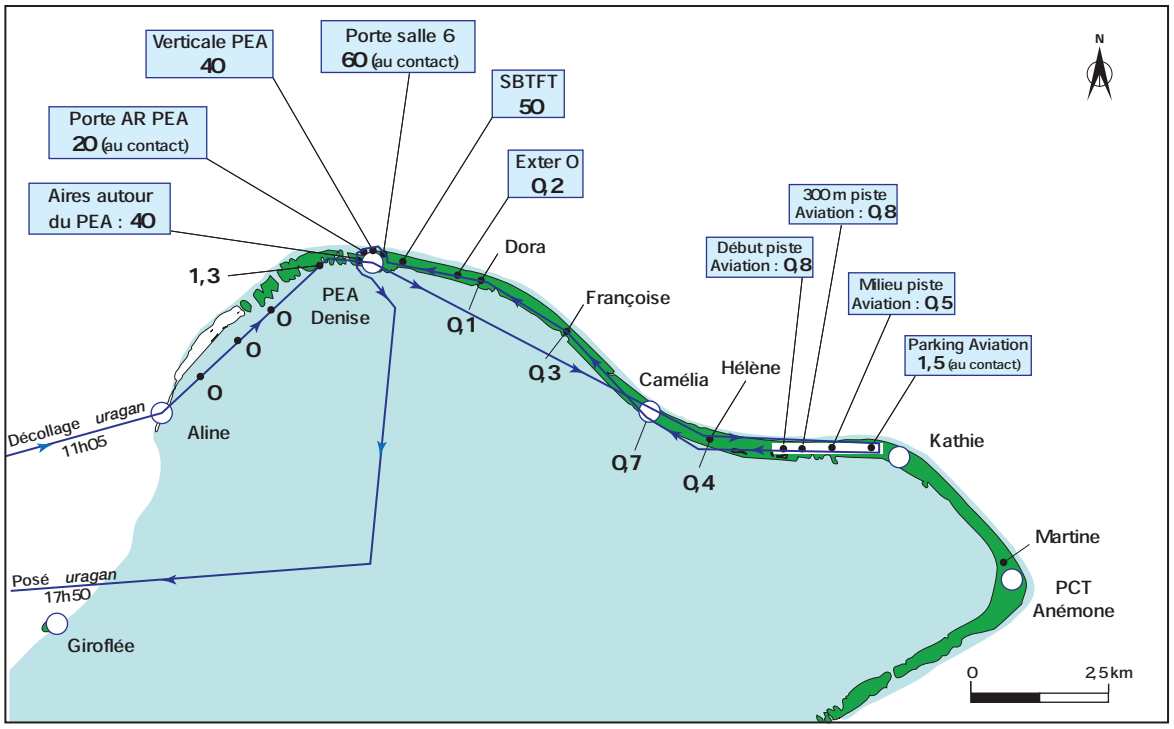


FIG. 235. - Débits de dose (mGy.h^{-1}) à 1 mètre au-dessus du sol de l'atoll de Mururoa entre H+0h35 et H+1h48 (mission RAD 1).

LICORNE — Essai n° 18

Date de l'essai : 3 juillet 1970, 10h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 500 m
Énergie : 914 kt



Informations météorologiques

Le 3 juillet, le vent au sol était d'est sud-est, et sa vitesse de l'ordre de 2 à 5 $m.s^{-1}$. En altitude, à partir de 3 000 m, il tournait brutalement au sud-ouest avec une vitesse de 10 $m.s^{-1}$, sa vitesse augmentait avec l'altitude et sa direction évoluait progressivement vers l'ouest. La vitesse maximale de 35 $m.s^{-1}$ pour des vents du 270 était observée à 12 000 m, diminuait ensuite très vite pour devenir inférieure à 5 $m.s^{-1}$ pour des vents du nord-ouest au-dessus de 19 000 m d'altitude.

Au moment de l'essai, le ciel était partiellement couvert avec des lignes de grains. La visibilité était bonne.

Une première tropopause se situait à 11 800 m et une seconde à 15 800 m d'altitude.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé à H+6min atteignait 24 000 m d'altitude et sa base 15 000 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Le 3 juillet, une augmentation de l'activité a été détectée sur les atolls inhabités du Groupe Actéon, principalement à Matureivavao, Marutea Sud et Maria. Le même jour, à Tureia, l'activité atmosphérique journalière associée à l'indice bêta global était de 0,5 $Bq.m^{-3}$.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Des augmentations de l'activité volumique atmosphérique de l'ordre 0,18 $Bq.m^{-3}$ ont été mesurées aux îles Gambier le 13 juillet et à Tureia le 14 juillet.

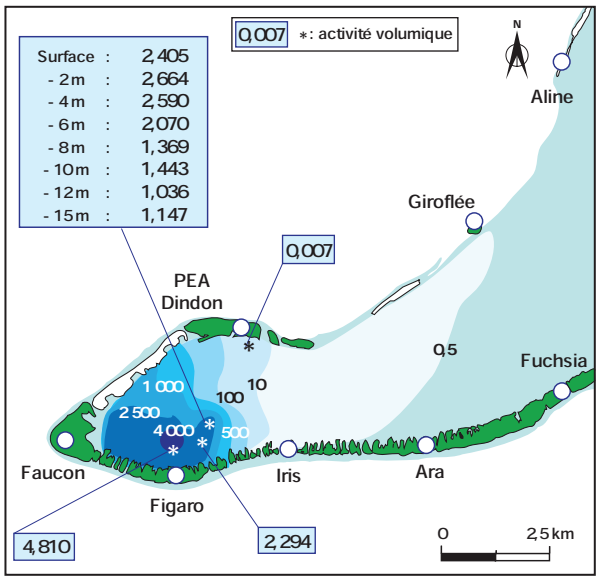


FIG. 236. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre au-dessus de la surface des eaux et activité volumique ($GBq.m^{-3}$) des eaux de surface du secteur Ouest du lagon de Mururoa entre H+4h30 et H+7h30.

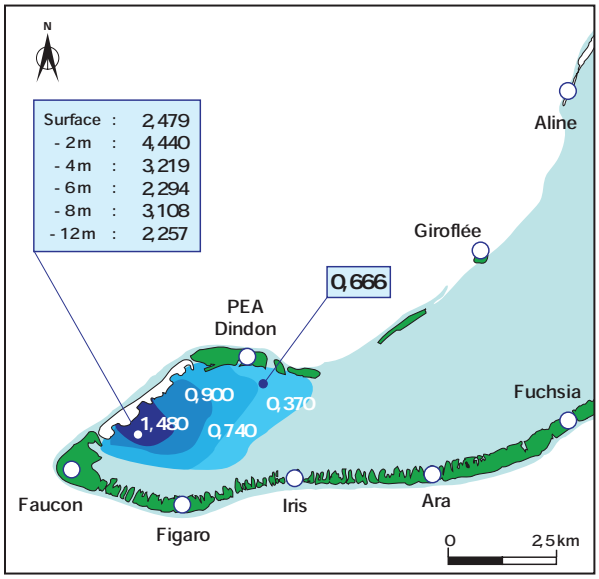


FIG. 237. - Activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux de surface jusqu'à -12 m de profondeur dans le secteur Ouest du lagon de Mururoa à J+5.

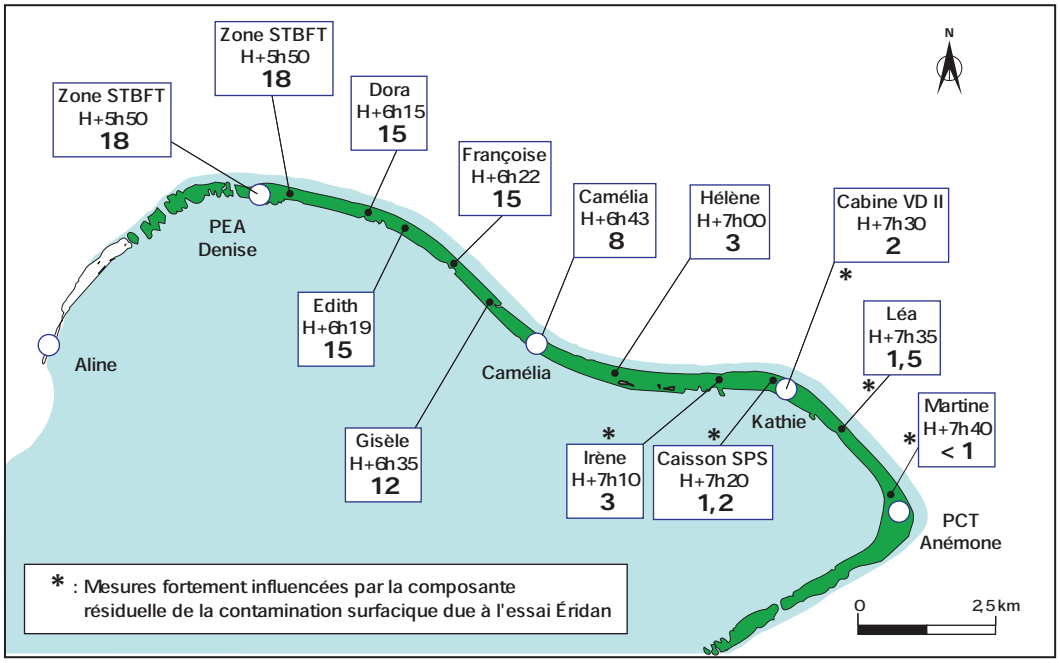
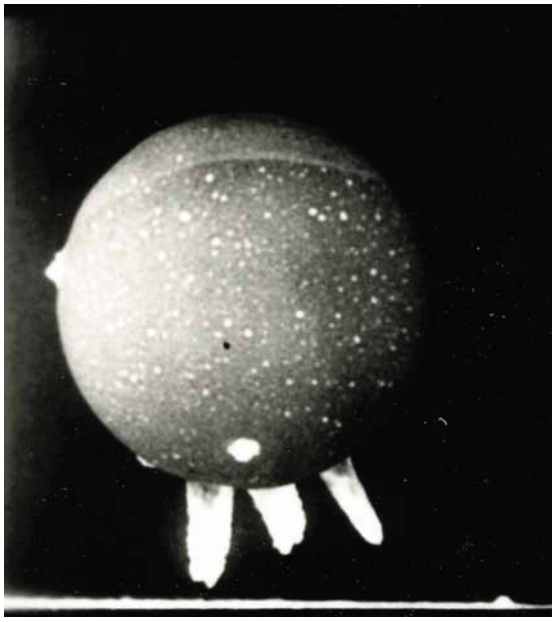


FIG. 238. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre au-dessus du sol des secteurs Nord et Est de l'atoll de Mururoa entre H+6h10 et H+8h00 (mission TER 2).

PÉGASE — Essai n° 19

Date de l'essai : 27 juillet 1970, 11h00 (heure locale)
Type d'essai : Sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 220 m
Énergie : 0,05 kt



Informations météorologiques

Le 27 juillet, l'atoll de Mururoa était encadré par deux anticyclones, l'un à l'est, dont la limite occidentale atteignait Reao et les îles Gambier ; l'autre à l'ouest, situé au sud-ouest des îles Australes. Une dépression était positionnée au sud de l'atoll et une zone de basses pressions au nord. Ces perturbations se déplaçaient lentement vers le nord-est. Au moment de l'essai, l'atoll de Mururoa était à la limite occidentale d'une zone frontale.

Jusqu'à 1 500 m, les vents étaient de sud-ouest avec des vitesses de 6 à 10 $m.s^{-1}$ puis tournaient à l'ouest et au nord-nord-ouest dans la tranche comprise entre 2 000 et 6 000 m d'altitude, leur vitesse ne dépassait pas 12 $m.s^{-1}$. Au-dessus, ils revenaient à l'ouest-nord-ouest, puis à l'ouest et enfin à l'ouest-sud-ouest à 9 000 m avec des vitesses de 15 à 20 $m.s^{-1}$. La tropopause était située à 16 500 m d'altitude.

Informations sur l'essai

La tête du nuage se situait vers 2 400 m d'altitude.

Îles et atolls habités concernés par les retombées immédiates

Une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique due à des précipitations a été mesurée sur les atolls de Reao et Puka Puka. À Reao, cette hausse commence le 27 juillet à 23H00 et atteint un niveau maximal de 1,5 $Bq.m^{-3}$, le 28 juillet.

Îles et atolls habités concernés par les retombées différées

Des retombées différées ont été détectées qui se sont traduites par une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique à Hiva Oa avec 0,037 $Bq.m^{-3}$ et Totegegie avec 0,1 $Bq.m^{-3}$ le 5 août ; à Reao avec 0,15 $Bq.m^{-3}$, le 6 août ; à Tahiti avec 1,85 $Bq.m^{-3}$ et à Tureia avec 0,1 $Bq.m^{-3}$, le 7 août.

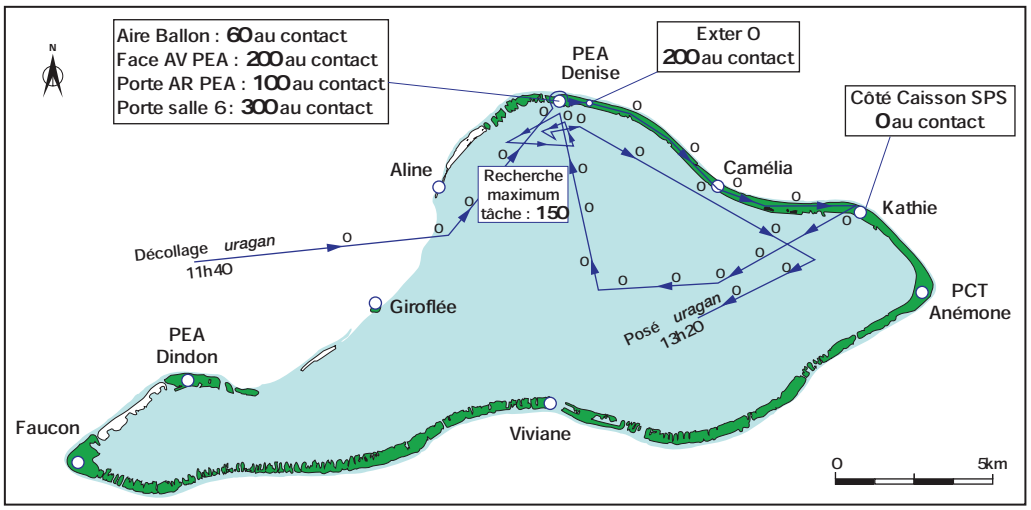


FIG. 239. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre au-dessus du sol et de la surface des eaux du lagon de l'atoll de Mururoa entre H+0h40 et H+2h20 (mission RAD 1).

ORION — Essai n° 20

Date de l'essai : 2 août 1970 à 11h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Fangataufa – Zone Frégate
Altitude : 400 m
Énergie : 72 kt



Informations météorologiques

L'essai Orion était initialement prévu le 31 juillet, la direction des vents en altitude étant défavorable, il a été reporté au 1er août, puis au 2.

Le 2 août, les vents, du sol jusqu'à 5 000 m d'altitude, étaient d'est, puis du nord-est, et leur vitesse était comprise entre 3 et 6 $m.s^{-1}$. De cette altitude jusqu'à 18 000 m, ils étaient d'ouest puis de l'ouest-nord-ouest avec des vitesses de 10 à 15 $m.s^{-1}$.

Après le passage d'une faible ligne d'averses au cours de la nuit du 1er au 2 août, le ciel était dégagé au moment de l'essai et la visibilité excellente. La tropopause se situait à 15 400 m d'altitude.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé à H+6min atteignait 16 500 m et sa base 10 500 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique de faible niveau a été détectée aux îles Gambier.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Deux séries de retours anticycloniques se sont superposées aux retombées des essais précédents, conduisant à une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique. La première série a été détectée du 6 au 10 août à Reao avec 0,15 $Bq.m^{-3}$, à Hao avec 0,26 $Bq.m^{-3}$, à Puka Puka avec 0,3 $Bq.m^{-3}$, à Tureia avec 0,1 $Bq.m^{-3}$ et à Tahiti avec 1,85 $Bq.m^{-3}$. La deuxième série a été détectée les 12 et 13 août à Totegegie avec 0,15 $Bq.m^{-3}$, à Reao avec 0,74 $Bq.m^{-3}$, à Puka Puka avec 0,26 $Bq.m^{-3}$, à Hiva Oa avec 0,15 $Bq.m^{-3}$, à Hao avec 0,63 $Bq.m^{-3}$, et à Tahiti avec 0,26 $Bq.m^{-3}$.

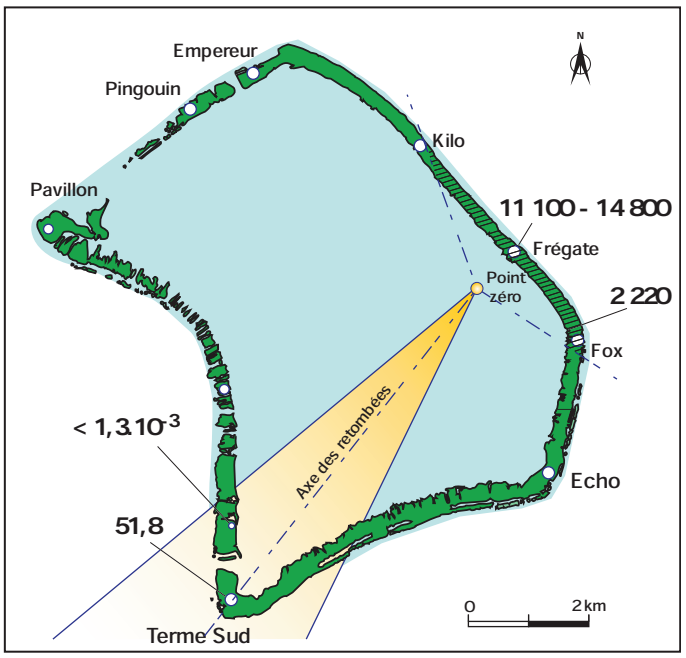


FIG. 240. - Dépôts surfaciques (GBq.m^{-2}) sur l'atoll de Fangataufa exprimés à H+1 après l'essai.

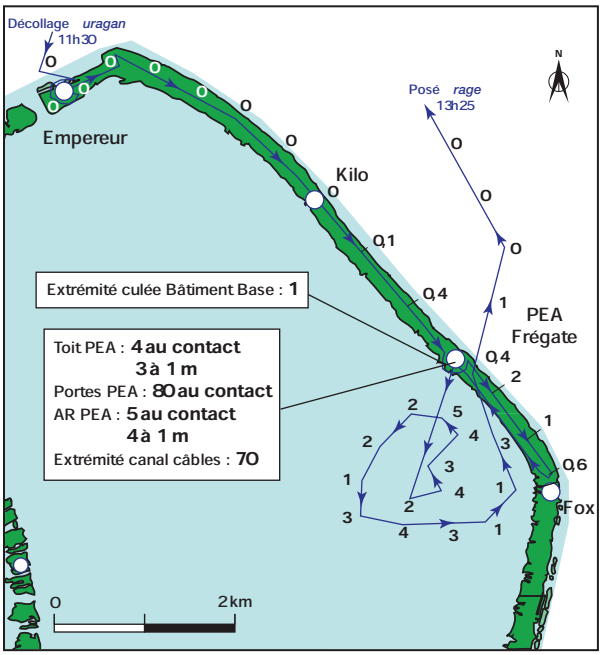


FIG. 241. - Débits de dose (mGy.h^{-1}) à 1 mètre au-dessus du sol et de la surface des eaux du secteur Nord-Est de l'atoll de Fangataufa entre H+0h30 et H+1h55 (mission RAD 1).

TOUCAN — Essai n° 21

Date de l'essai : 6 août 1970, 11h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 500 m
Énergie : 594 kt



Informations météorologiques

Le 6 août, dans la basse couche, du sol jusqu'à 3 000 m d'altitude, un régime d'alizés bien établi donnait des vents d'est-nord-est ayant une vitesse de 15 à 20 nœuds. En altitude, au-dessus de cette couche d'alizés et d'une couche de transition comportant des vents faibles et non organisés jusqu'à 5 000 m d'altitude, un flux d'ouest assez régulier était établi jusqu'à 18 000 m d'altitude avec des vitesses de 35 à 50 nœuds.

Au moment de l'essai, le ciel était peu nuageux avec des bancs isolés de strato-cumulus et quelques petits cumulus. La visibilité était excellente. La tropopause se situait à 14 900 m d'altitude.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé à H+6min atteignait 19 000 m d'altitude et sa base 14 000 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique a été détectée aux îles Gambier le 7 août à 14h00, le maximum a été atteint le 8 août entre 1h00 et 3H00. L'activité atmosphérique journalière était de 0,55 Bq.m^{-3} et a atteint pendant une heure un maximum de 3,5 Bq.m^{-3}.

Îles et atolls habités concernés par les retombées différées

Des augmentations de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique ont été détectées les 8 et 9 août par l'ensemble des postes de contrôle radiologique, à l'exception de celui de Rapa. Il s'agissait, dans l'ordre croissant des niveaux d'activité des postes de Reao avec 0,4 Bq.m^{-3}, de Pukarua, Hao, Rangiroa, Anaa, Tahiti et Hiva Oa.

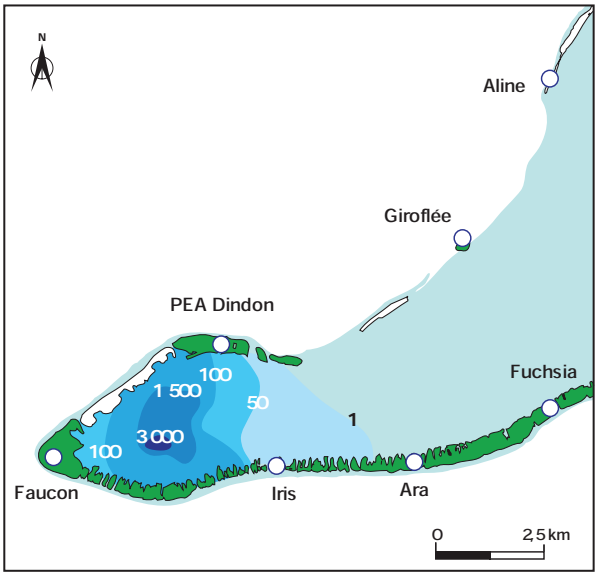


FIG. 242. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre au-dessus des eaux de surface du lagon du secteur Ouest de l'atoll de Mururoa de H+2h30 à H+14h0 (mission LCPS).

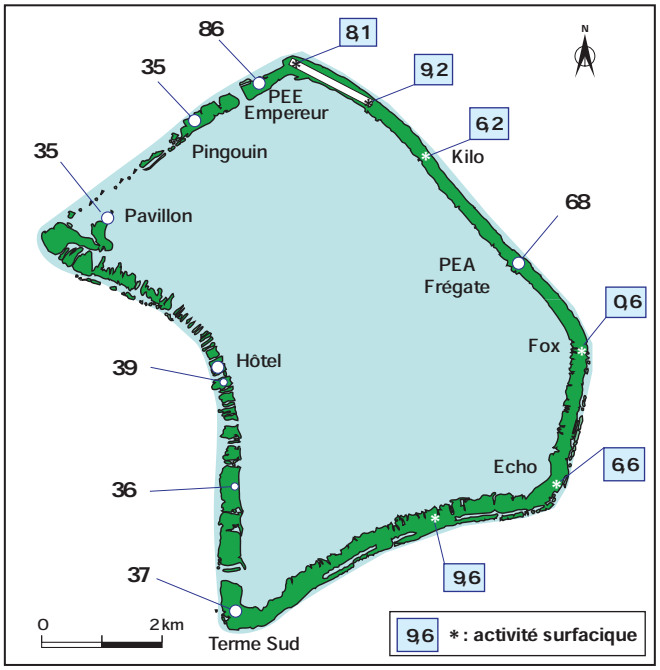


FIG. 243. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre au-dessus du sol et activité surfacique ($MBq.m^{-2}$) à la fin de la retombée (H+3h30) sur l'atoll de Fangataufa.

CAMPAGNE 1971

La campagne 1971 a concerné cinq essais atmosphériques sous ballon. Le service central hydrographique de la marine a diffusé les AVURNAV le 22 avril puis les avis d'activation des zones dangereuses avant chaque série d'essais entre J-8 et J-5 et les avis de désactivation entre J+1 et J+4 après les essais. Le service d'informations aéronautiques a publié un NOTAM le 29 avril annonçant la création des zones dangereuses entre le 1er juin et le 30 septembre, puis le NOTAM d'activation de celles-ci entre J-5 et J-4 et de désactivation entre J+1 et J+4 après l'essai. Le risque à prendre en compte pour les occupants des capsules spatiales habitées se trouvant à vue directe du point zéro de l'explosion, étant celui du flash lumineux, aucun essai n'a eu lieu lorsqu'un satellite habité passait à portée des effets lumineux des explosions.

En 1971, la situation météorologique a été une suite de conditions complexes et instables, marquée par des conditions météorologiques peu favorables, caractérisées par des vents forts et des grains violents, entraînant des retards dans la préparation du ballon. Les jours de retard survenus au cours de cette campagne ont tous eu pour cause des conditions météorologiques défavorables. La statistique établie à partir des conditions météorologiques observées sur 110 jours, montre que les possibilités d'essai se résumaient à :

- 48 jours où l'essai était interdit,
- 62 jours où un essai était possible avec quelques interdictions concernant le secteur Est de l'atoll.

Les contraintes météorologiques ont été telles, qu'un essai sur deux n'a été possible au jour initialement prévu.

Cette campagne a été marquée par une augmentation importante des pénétrations pilotées, 22 missions au lieu de 12 l'année précédente. Le dispositif d'arrosage en pluie pour éliminer d'éventuels dépôts sur la zone portuaire a été maintenu. L'utilisation en a été étendue à la darse Kathie et au parking aviation, permettant ainsi l'accès direct de la darse à la zone d'escale de l'aéroport, afin de faciliter le transfert des personnels entre les bateaux au mouillage et les avions en partance vers Hao ou Papeete. La surface ainsi protégée a été portée de 2,7 ha en 1970 à 3,3 ha en 1971. Un revêtement plastique arrachable (avec trame) a également été mis en place sur 3 700 m^2 des aires bétonnées de la zone Kathie.

Des évaluations de l'exposition des populations ont été réalisées suite à la détection sur l'atoll de Tureia de retombées provoquées par l'essai Encelade et sur les îles Gambier après l'essai Phoebé. Les estimations ont conduit à des doses inférieures à 4 mSv (cf. Chapitre VI). Ces doses sont inférieures à la limite annuelle admissible pour les populations de 5 mSv à cette date. Sur les autres îles, le niveau des retombées a été inférieur à ceux observés en 1970.

DIONÉ — Essai n° 22

Date de l'essai : 5 juin 1971, 10h15 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 275 m
Énergie : 34 kt



Informations météorologiques

Le 5 juin, les vents au sol et en altitude étaient d'ouest. Leur vitesse était de l'ordre de 6m.s^{-1} au sol, elle passait à 10m.s^{-1} entre 500 à 4 000 m d'altitude pour atteindre 25 m.s^{-1} entre 6 000 et 14 000 m. Au moment de l'essai le ciel était semi-couvert, les vents modérés, la visibilité supérieure à 20 km. La tropopause était à 12 900 m d'altitude.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé était à 13 400 m d'altitude, sa base à 11 200m et son rayon était de 2 900 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique de très faible niveau a été détectée aux îles Gambier 6h45 après l'essai, avec un maximum atteint à Vairaatea, 9h15 après l'essai.

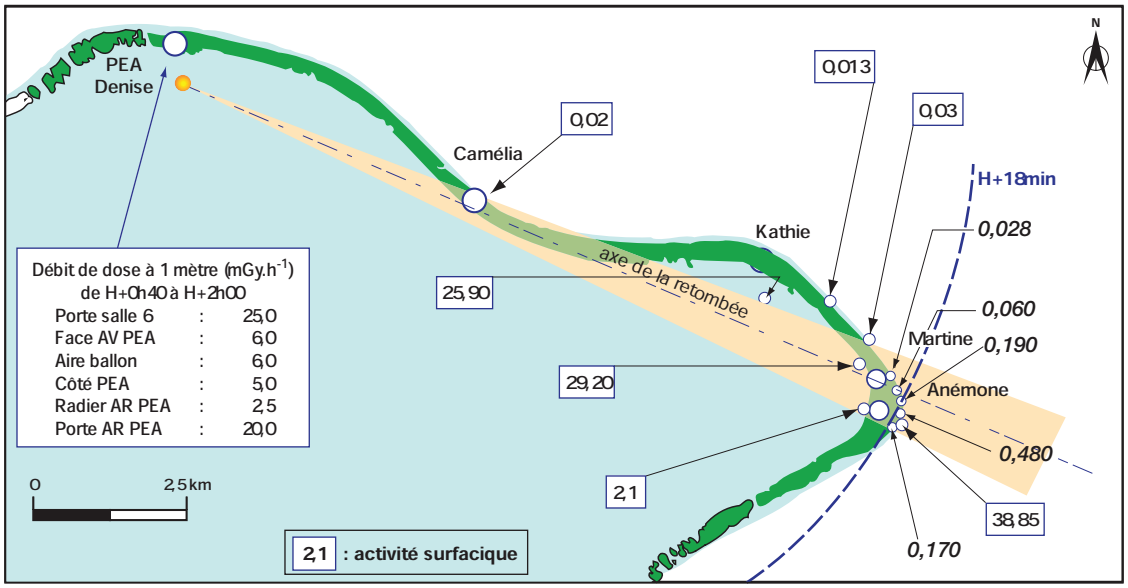


FIG. 244. - Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) à 1 mètre et activité surfacique ($MBq.m^{-2}$) à H+1 des secteurs Nord et Est de l'atoll de Mururoa.

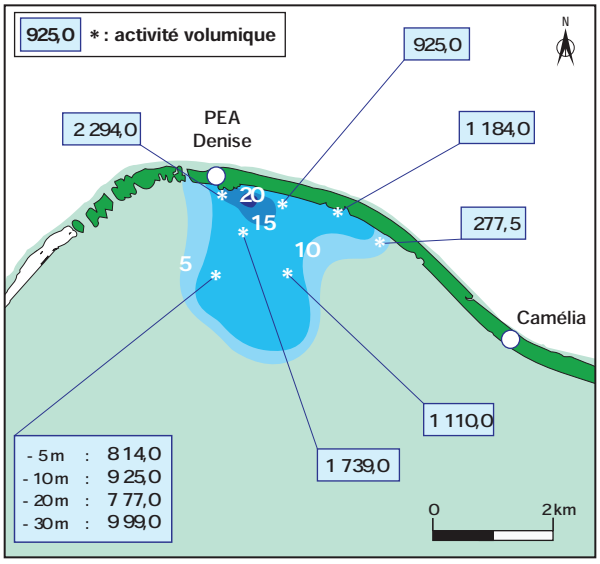


FIG. 245. - Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) à 1 mètre et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) entre H+3 et H+5 du secteur Nord de l'atoll de Mururoa.

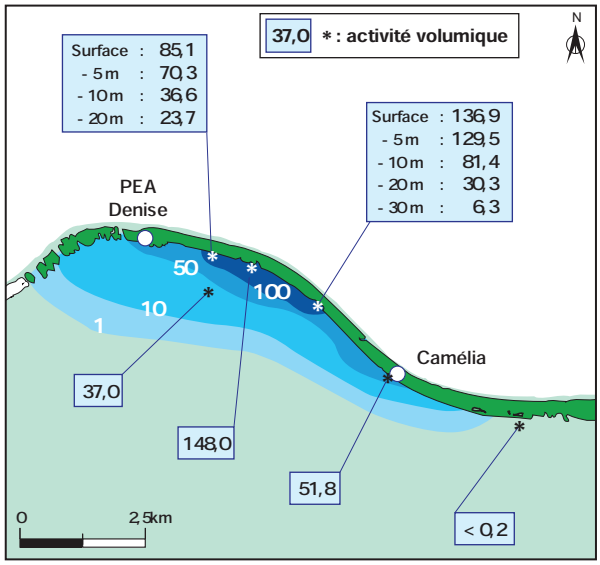


FIG. 246. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux de surface du secteur Nord du lagon de l'atoll de Mururoa entre H+22 à H+27.

ENCELADE — Essai n° 23

Date de l'essai : 12 juin 1971, 10h15 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 450 m
Énergie : 440 kt



Informations météorologiques

Le 12 juin, la situation météorologique locale était complexe. Les vents étaient du sud-est, à 5 $m.s^{-1}$. En altitude, ils étaient de sud-ouest avec une vitesse assez faible de 10 $m.s^{-1}$ à 9 m. Pour les altitudes supérieures, les vents soufflaient d'ouest avec une vitesse de l'ordre de 20$m.s^{-1}$.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé à H+10min atteignait 17 000 m d'altitude, sa base 13 500 m et son rayon était de 13 000 m.

Îles et atolls habités concernés par les retombées immédiates

Une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique due principalement à des précipitations a été mesurée sur l'atoll de Tureia 8h50 après l'essai. Une augmentation de radioactivité a également été détectée à Vairaatea avec 0,66 $Bq.m^{-3}$, à Raivavae avec 0,85 $Bq.m^{-3}$, à Tahiti (Mahina) avec 0,52 $Bq.m^{-3}$, à Hao avec 0,3 $Bq.m^{-3}$, à Reao, Pukarua, Hiva Oa et Rapa.

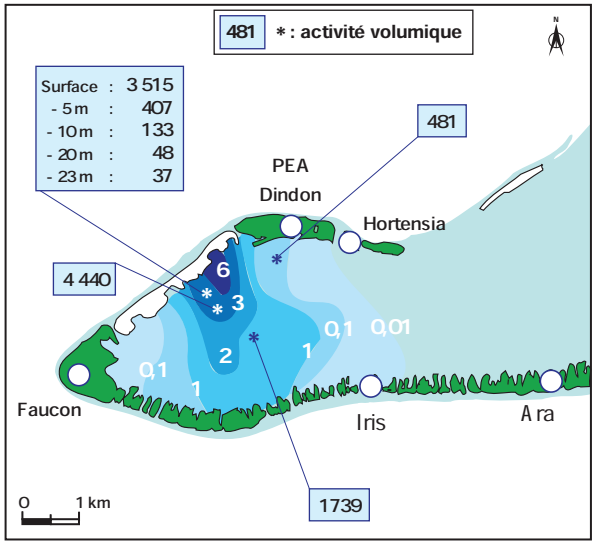


FIG. 247. - Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) à 1 mètre au-dessus de la surface des eaux et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux de surface et suivant un profil vertical jusqu'à -23 m de profondeur dans le secteur Ouest de l'atoll de Mururoa entre H+3h30 et H+6h30.

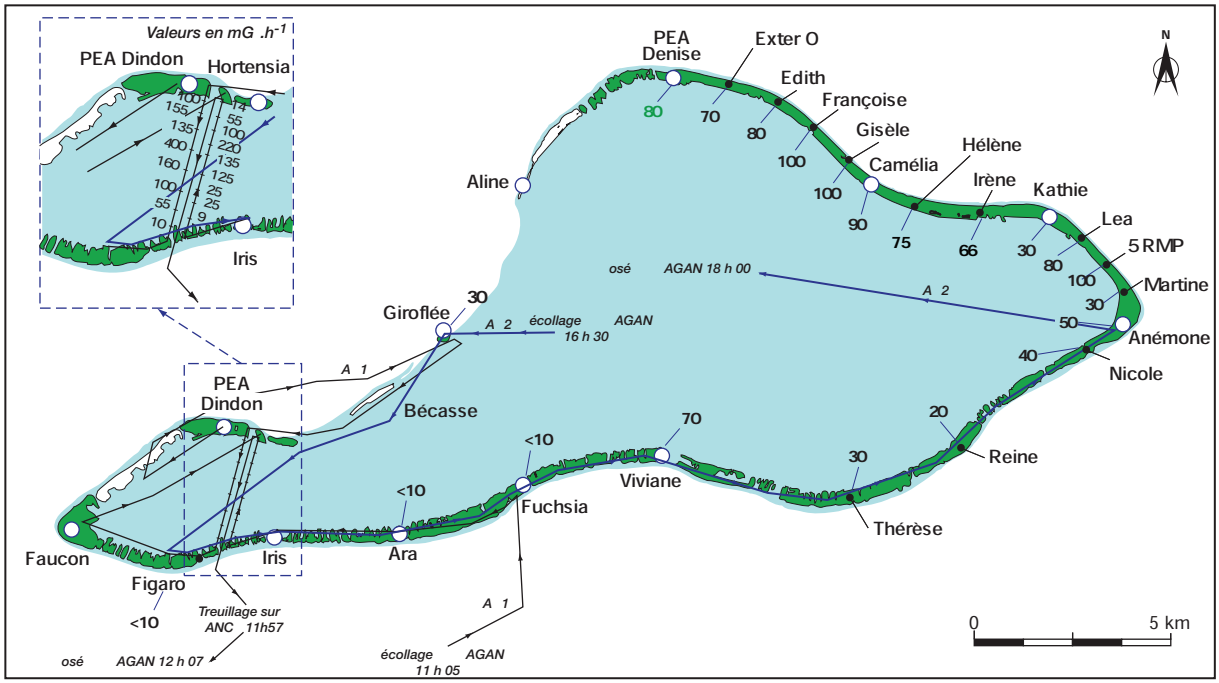


FIG. 248. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à Mururoa lors des différentes missions réalisées le jour de l'essai.

➞ Les détails de l'évaluation des conséquences radiologiques de l'essai Encelade pour la population et l'environnement de l'atoll de Tureia sont présentés dans le chapitre VI.

JAPET — Essai n° 24

Date de l'essai : 4 juillet 1971, 12h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 230 m
Énergie : 9 kt



Informations météorologiques

Le 4 juillet, les vents au sol et en altitude étaient de sud-ouest. Au sol, leur vitesse était faible, de l'ordre de 1 à 2 $m.s^{-1}$, et elle atteignait progressivement 34 $m.s^{-1}$ à l'altitude de 7 000 m. La tropopause se situe à 14 100 m.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé atteint 9 000 m d'altitude, sa base noyée dans les nuages est aux environs de 5 500 m et son rayon était de 1 400 m.

Îles et atolls habités concernés par les retombées immédiates

À l'exception de Tureia, aucune augmentation significative de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique n'a été mesurée sur les autres îles habitées de Polynésie.

Îles et atolls habités concernés par les retombées différées

Une légère augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique due à un retour anticyclonique a été mesurée sur les îles suivantes : Bora Bora, Rapa, Raivavae, Pukarua et Papeete.

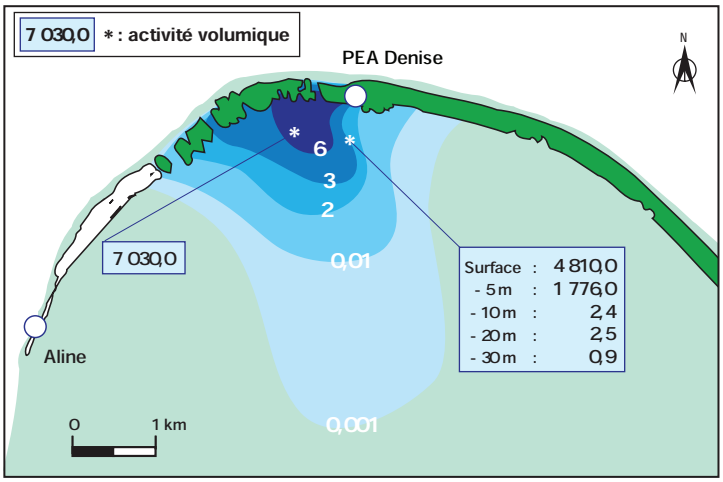


FIG. 249. - Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) à 1 mètre et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux de surface et jusqu'à 30 m de profondeur dans le secteur Nord de l'atoll de Mururoa entre H+2h30 à H+5h00.

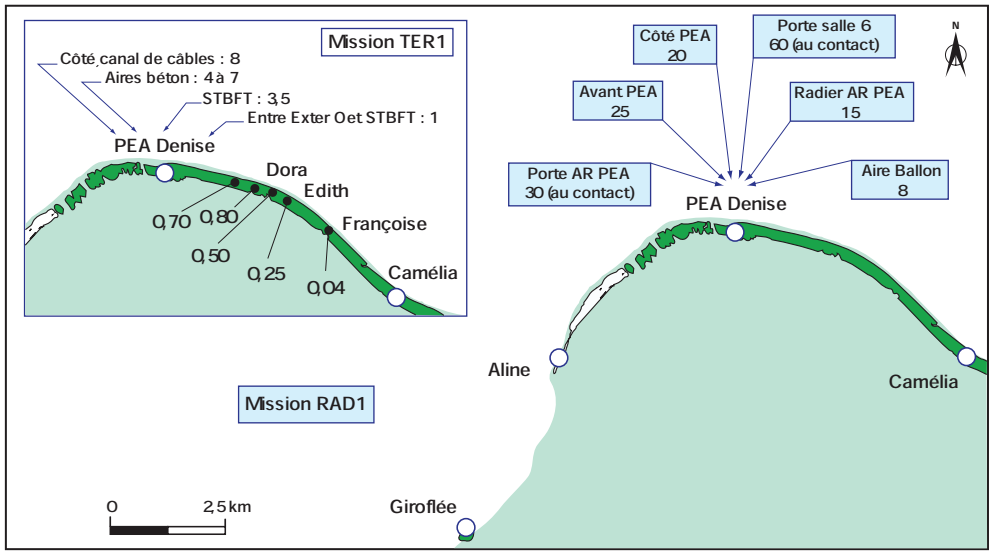


FIG. 250. - Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) dans le secteur Nord de l'atoll de Mururoa le jour de l'essai (missions RAD1 et TER1).

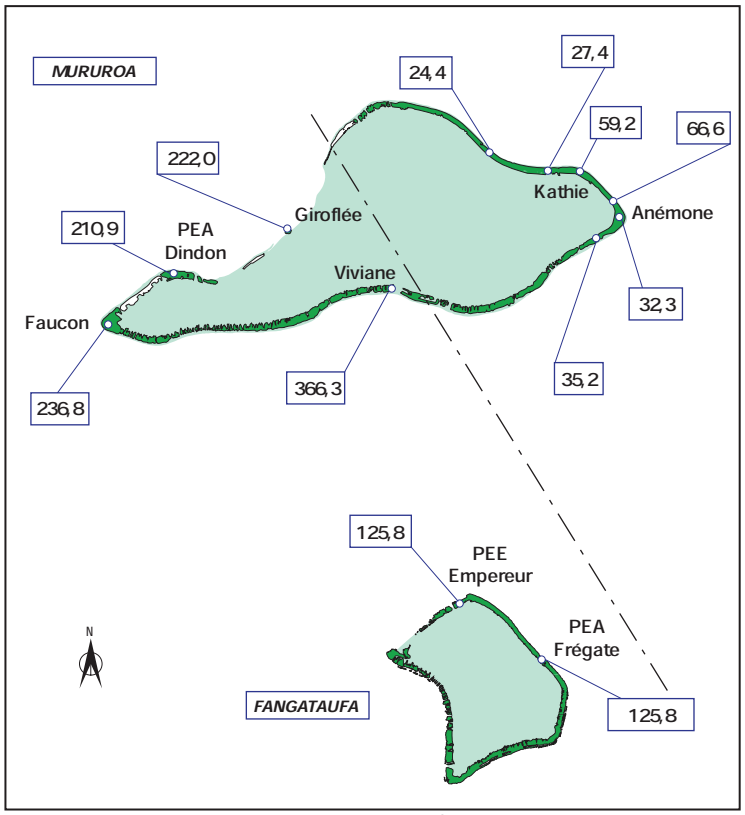


FIG. 251. - Activité surfacique ($kBq.m^{-2}$) à H+14 de la retombée intervenue entre J (23h30) et J+1 (8h00) sur les atolls de Mururoa et Fangataufa.

PHOEBÉ Essai n° 25

Date de l'essai : 8 août 1971, 9h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 230 m
Énergie : 4 kt



Informations météorologiques

Le 8 août, les vents au sol étaient du sud-est avec une vitesse de l'ordre de 5 $m.s^{-1}$. À partir de 1 500 m d'altitude, ils étaient d'ouest et leur vitesse était de 20 à 25 $m.s^{-1}$, entre 2 000 à 5 000 m d'altitude. Au moment de l'essai, le ciel était couvert, les vents modérés, la visibilité supérieure à 15 km. La tropopause était située à 13 500 m.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé à H+10min atteignait 4 800 m d'altitude et sa base 1 800 m. La présence d'une masse nuageuse à l'altitude de la tête gênait son observation et empêchait la bonne connaissance de ses caractéristiques dimensionnelles.

Îles et atolls habités concernés par les retombées immédiates

Après l'essai, des conditions météorologiques défavorables ont entraîné le nuage radioactif vers les îles Gambier. Des dépôts humides y ont été constatés entre 6h10 et 6h40 après l'essai. La population, dans les abris de prévoyance depuis le début de l'après-midi, y est restée pour la nuit et a repris une vie normale le matin du 9 août.

Des traces de radioactivité ont été détectées à Tureia le 9 août, Vairaatea et Hao le 10 août.

Iles et atolls habités concernés par les retombées différées

Une augmentation du débit de dose associé aux retombées a été mesurée à Tureia le 9 août, avec 160 $nGy.h^{-1}$, puis à Vairaatea avec 80 $nGy.h^{-1}$ et à Hao le 10 août.

➞ Les détails de l'évaluation des conséquences radiologiques de l'essai Phoebé pour la population et l'environnement des îles Gambier sont présentés dans le chapitre VI.

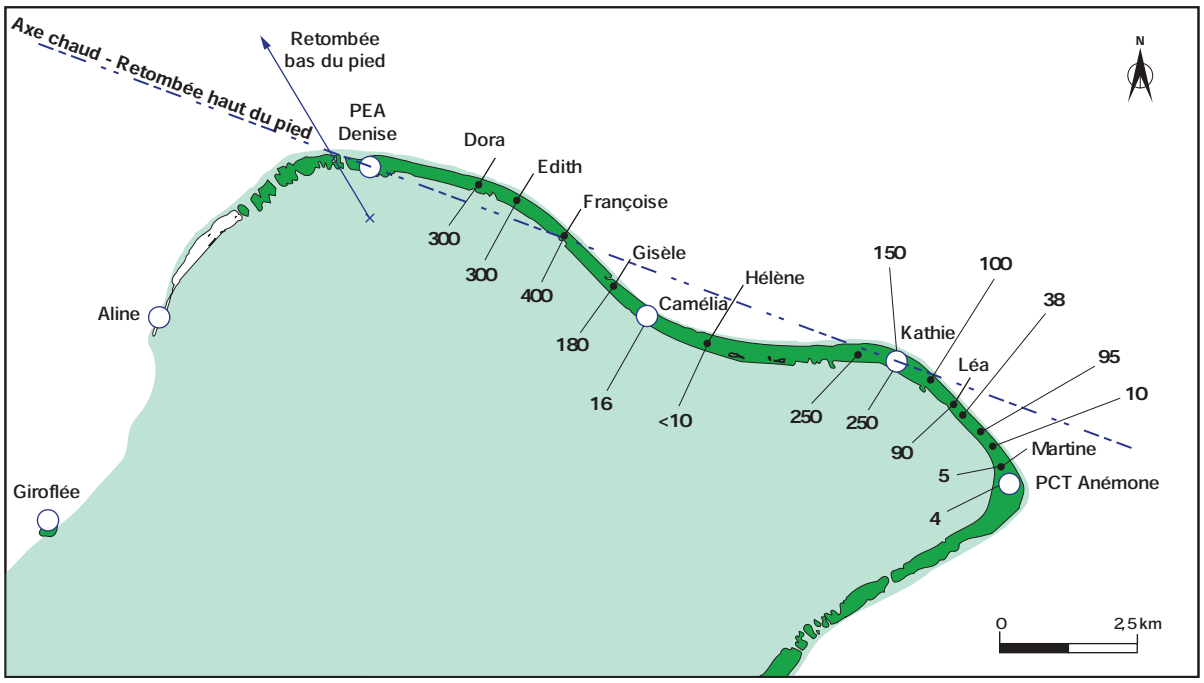


FIG. 252. - Débits de dose (µGy.h^{-1}) à 1 mètre au-dessus du sol à H+1 des secteurs Nord et Est de l'atoll de Mururoa.

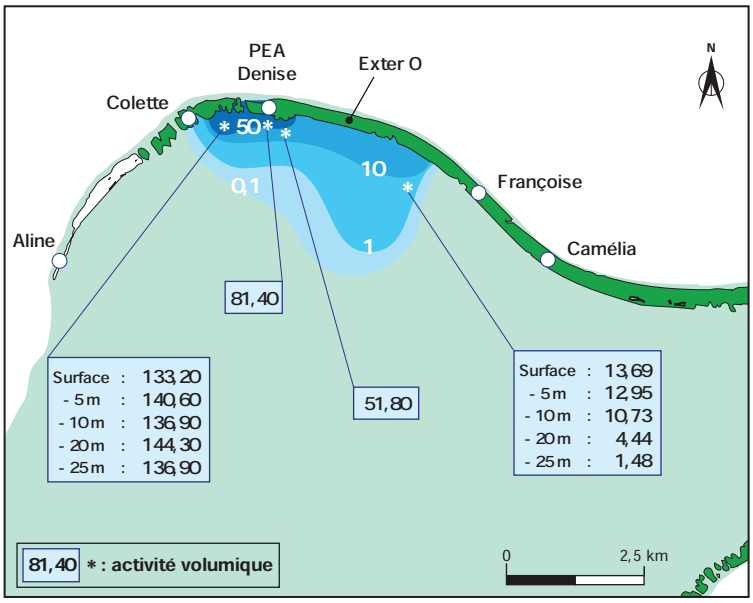


FIG. 253. - Débits de dose (µGy.h^{-1}) à 1 mètre et activité volumique (MBq.m^{-3}) des eaux du lagon dans le secteur Nord de l'atoll de Mururoa entre H+22 et H+26.

RHÉA — Essai n° 26

Date de l'essai : 14 août 1971, 10h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 480 m
Énergie : 955 kt



Informations météorologiques

Le 14 août, les vents au sol étaient d'est-nord-est et de faible vitesse allant de 2 à 3 $m.s^{-1}$. En altitude, au-dessus de 1 500 m, les vents étaient d'ouest avec une vitesse maximale de 30 $m.s^{-1}$ entre 9 000 et 12 000 m. Au moment de l'essai, le ciel était dégagé.

Informations sur l'essai

La base du nuage stabilisé était à 15 500 m d'altitude, sa tête atteignait 20 000 m d'altitude et son rayon était de 1 800 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Les îles inhabitées de Matureivavao et Marutea Sud ont été touchées par de faibles retombées, respectivement 5 heures et 7 heures après l'essai. Aux îles Gambier, une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique a été détectée 19h30 après l'essai, avec un maximum 22h40 après l'essai.

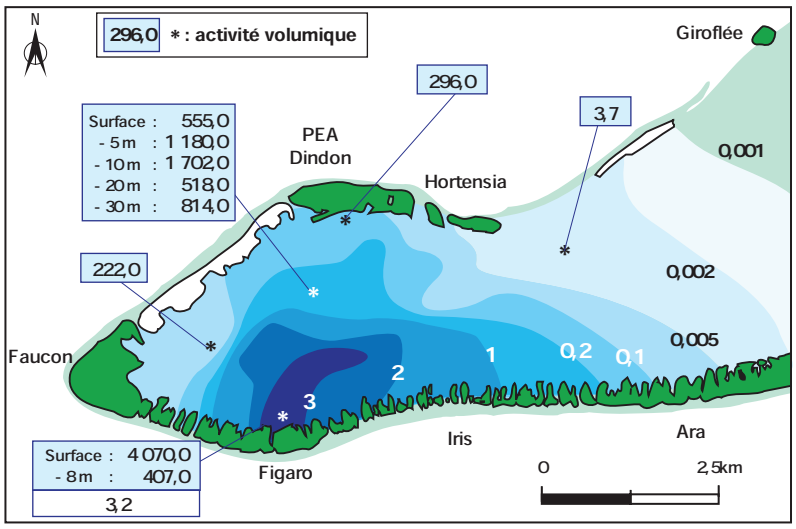


FIG. 254. - Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) à 1 mètre et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux du lagon dans le secteur Ouest de l'atoll de Mururoa entre H+4h00 et H+7h00.

CAMPAGNE 1972

La campagne 1972 a concerné quatre essais atmosphériques, trois sous ballon et un essai de sécurité sur tour. Les zones dangereuses ont été activées à partir du 20 juin par AVURNAV et NOTAM diffusés le 18 juin. Elles sont restées en vigueur pendant la totalité de la campagne et ont été désactivées le 2 août. Suite aux contraintes liées aux engins testés et aux conditions météorologiques médiocres, peu de jours ont été favorables à l'exécution des essais pendant la période du 21 juin au 1er août.

Durant cette campagne il n'y a pas eu de tirs de fusées de prélèvement d'aérosols dans le nuage et pour la première fois :

- des hélicoptères lourds Super Frelon ont assuré les missions de récupération des enregistrements à la place des Alouette III,
- un Boeing C 135 a assuré le contact radiamétrique du nuage,
- deux DC 6 ont été chargés de mesures électromagnétiques complémentaires.

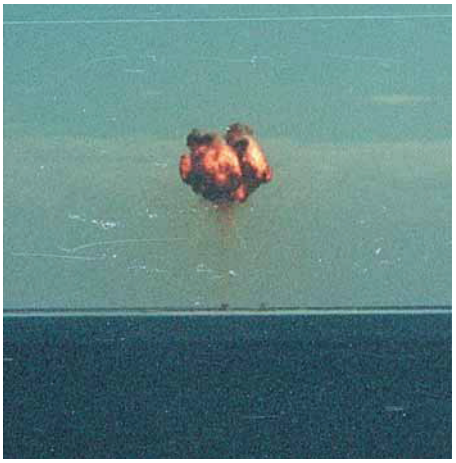
Les retombées observées ont été très faibles sur les îles de la Polynésie française à l'exception de celles observées sur l'atoll de Hereheretue à la suite de l'essai Umbriel. L'évaluation de l'exposition annuelle a conduit à une dose de 0,2 mSv, soit 4 % de la limite annuelle admissible pour les populations qui était de 5 mSv à cette date. Le faible niveau des retombées envisageables sur l'atoll de Pukarua ne justifiait plus l'utilisation de l'abri de prévoyance.

Deux accidents ont été déplorés, la perte d'une Alouette II le 16 mai, sans victime, puis celle d'un Boeing KC135 le 30 juin, à proximité de Hao, entraînant la disparition des 4 membres de l'équipage et de deux observateurs.

Les avions de la compagnie aérienne *Lan Chile* et le trafic commercial maritime n'ont à aucun moment été retardés ou déroutés.

UMBRIEL — Essai n° 27

Date de l'essai : 25 juin 1972, 10h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 230 m
Énergie : 0,5 kt



Informations météorologiques

Le 25 juin, la situation météorologique était favorable. Un anticyclone était centré sur les îles australes, bordé à l'est et au nord-ouest par des zones de faible pression. Les vents étaient de sud-est, établis dans la basse troposphère, et de sud-ouest à partir de 3 000 m d'altitude. Au sol, les vents étaient du 140 (SE) avec une vitesse de 15 à 20 nœuds et au-dessus de 3 000 m, du 240 avec une vitesse pouvant dépasser 50 nœuds.

La tropopause se situait à 12 300 m d'altitude.

Informations sur l'essai

Une inversion dans le profil de température à 2 000 m d'altitude était à l'origine d'une hauteur de stabilisation relativement basse du nuage : 2 400 m au lieu des 3 500 m attendus.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

À Hereheretue, une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique est détectée 19 heures après l'essai, atteignant 17 $Bq.m^{-3}$. À Tahiti, une augmentation de l'activité volumique est mesurée 30 heures après l'essai et la moyenne atmosphérique journalière s'est établie à 2 $Bq.m^{-3}$, à Mahina, et à 1 $Bq.m^{-3}$, à Taravao. Dès le lendemain, l'activité volumique de l'atmosphère était revenue au niveau d'avant l'essai.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Des augmentations de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique correspondant à des retombées différées dues à des retours anticycloniques ont été relevées entre le 1er et le 4 juillet à Hereheretue, avec un maximum de 0,1 $Bq.m^{-3}$, et le 5 juillet à Bora Bora et Tahiti, avec 5 $mBq.m^{-3}$.

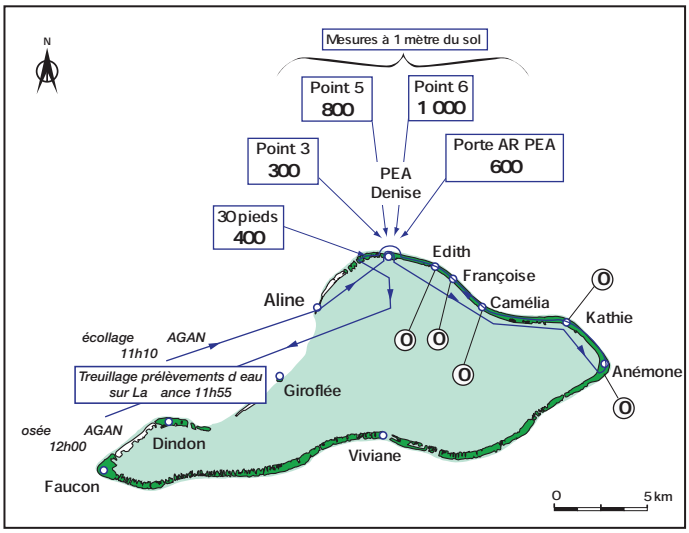


FIG. 255. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 30 pieds entre H+1h10 et H+2h00 dans les secteurs Nord et Est de l'atoll de Mururoa (mission RAD 1).

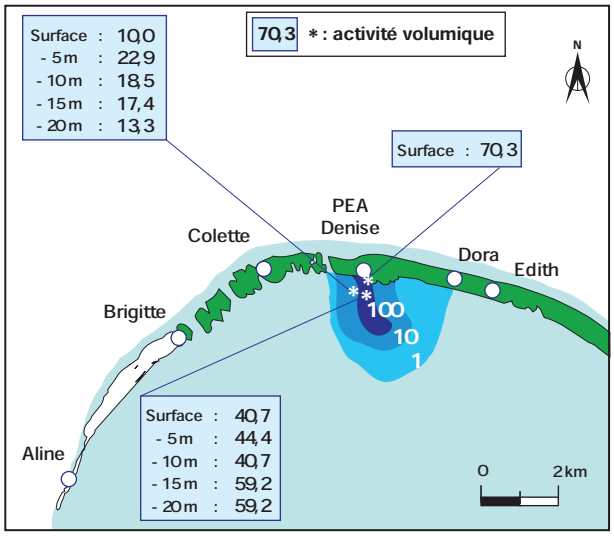


FIG. 256. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) des eaux du lagon du secteur Nord de l'atoll de Mururoa entre H+2h30 et H+4h30 (mission LCPS).

TITANIA — Essai n° 28

Date de l'essai : 30 juin 1972, 9h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 220 m
Énergie : 4 kt



Informations météorologiques

Le 30 juin, le profil thermodynamique de l'atmosphère, dans lequel s'est développé le nuage, était caractérisé par une humidité particulièrement faible à partir de 2 000 m et par une température relativement élevée à tous les niveaux.

Les vents au sol étaient d'est-nord-est (60°) à 10 $m.s^{-1}$ et tournaient en altitude vers l'est (96°) à partir de 5 000 m à 4 $m.s^{-1}$, puis au sud-est entre 6 000 et 8 000 m, toujours avec des vitesses très faibles (3 à 4,1 $m.s^{-1}$). La tropopause se trouvait à une altitude de 16 700 m.

Informations sur l'essai

La base du nuage était à 2 600 m d'altitude, sa tête atteignait 5 800 m, le rayon était de 1 800 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Cet essai n'a donné lieu à aucune détection de retombées directes sur les îles ou atolls de Polynésie.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Des augmentations de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique correspondant à des retombées différées de faible niveau ont été relevées sur 6 atolls polynésiens :

- Bora Bora les 10, 12 et 14 juillet, avec un maximum journalier de 0,037 $Bq.m^{-3}$;
- Hao les 11, 13 et 17 juillet, avec un maximum journalier de 0,018 $Bq.m^{-3}$;
- Hiva Oa, du 12 au 17 juillet, avec un maximum journalier de 0,05 $Bq.m^{-3}$;
- Reao les 12, 13 et 15 juillet, avec un maximum journalier de 0,03 $Bq.m^{-3}$;
- Puka Puka les 13, 16 et 17 juillet, avec un maximum journalier de 0,03 $Bq.m^{-3}$;
- Tureia le 13 et du 19 au 22 juillet, avec un maximum journalier de 0,015 $Bq.m^{-3}$.

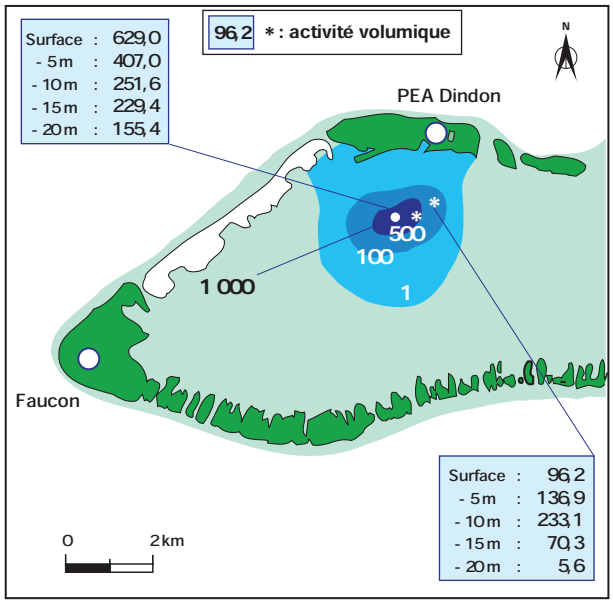


FIG. 257. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre au-dessus de la surface des eaux du lagon et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) entre H+2h00 à H+5h30 dans le secteur Ouest du lagon de l'atoll de Mururoa (mission LCPS).

OBÉRON — Essai n° 29

Date de l'essai : 27 juillet 1972, 9h40 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 220 m
Énergie : 6 kt



Informations météorologiques

Le 27 juillet, au niveau du site, un col isobarique a laissé place à partir de 2 000 m à un anticyclone s'infléchissant vers le nord-est et générant des vents irréguliers et faibles de 5 $m.s^{-1}$, de nord-est au sol, réguliers et assez forts d'ouest-nord-ouest à partir de 2 000 m atteignant 31 $m.s^{-1}$ entre 7 000 et 9 000 m d'altitude. Le ciel était nuageux. La tropopause se trouvait à une altitude de 16 600 m.

Informations sur l'essai

La base du nuage a atteint 6 500 m et sa tête 8 500 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Une augmentation de la radioactivité de faible niveau a été détectée aux îles Gambier.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Des augmentations de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique ont été détectées sur 6 îles au cours du mois d'août :

- à Puka Puka le 8 août, avec 0,022 $Bq.m^{-3}$;
- à Hiva Oa les 10 et 11, avec 0,011 $Bq.m^{-3}$;
- à Hao le 12, avec 0,022 $Bq.m^{-3}$;
- à Bora Bora les 16, 17 et 20, avec 0,027$Bq.m^{-3}$;
- à Tahiti du 17 au 20, avec 0,0074 $Bq.m^{-3}$;
- à Rangiroa le 17, avec 0,006 $Bq.m^{-3}$.

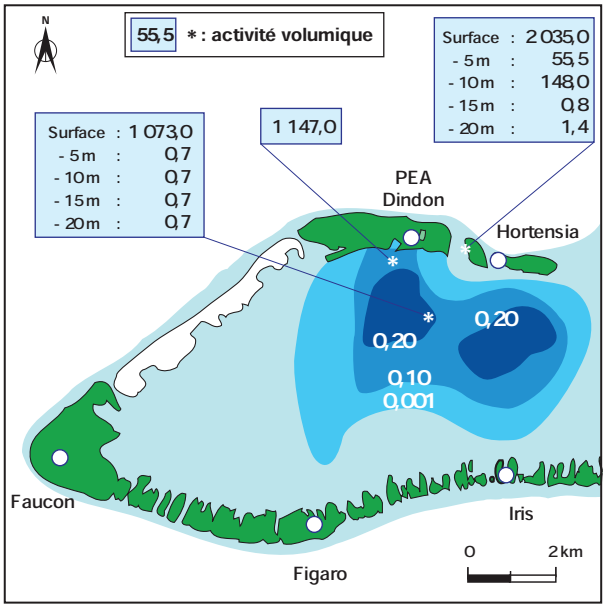


FIG. 258. - Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) à 1 mètre et activité volumique (37 $MBq.m^{-3}$) entre H+3h00 et H+5h00 dans le secteur Ouest de l'atoll de Mururoa (mission LCPS).

CAMPAGNE 1973

La campagne 1973 a concerné cinq essais atmosphériques sous ballon et un essai de sécurité sur tour. Cette campagne a comporté deux séries d'essais :

- deux essais sous ballon, Euterpe et Melpomène, initialement prévus les 20 et 25 juillet et réalisés les 21 et 28 juillet.
- deux essais sous ballon, Pallas et Parthénope prévus les 20 et 25 août, réalisés les 18 et 24 août et un essai d'arme en altitude, Tamara, par largage d'un avion Mirage III le 28 août.

Les conditions météorologiques rencontrées ont été relativement complexes. De longues périodes de vents forts au sol ont contrarié la mise en œuvre des ballons porteurs d'engins. Ainsi, trois des quatre ballons utilisés ont été soit gonflés, soit transférés, par vents de 20 à 32 nœuds avec passage de grains. Par contre le comportement en vol de ces quatre ballons a été excellent et a permis de réaliser le positionnement précis de la nacelle.

Lors de cette campagne et pour la première fois, l'état-major du Goen est resté à terre sur l'atoll de Mururoa abrité à l'intérieur d'un blockhaus situé en zone Martine où avait été installé le Poste de Commandement (PC).

En 1973, les retombées radioactives sur les îles et atolls de Polynésie ont été très faibles, y compris sur les atolls d'expérimentations. Ainsi, les expositions intégrées sur l'année ont été évaluées pour la population de Hereheretue à 0,3 mSv, de Raivavae à 0,07 mSv, de Tubuai à 0,05 mSv et de Tahiti entre 0, 02 et 0,04 mSv. Sur tous les autres atolls ou îles hautes les doses intégrées sur l'année ont été encore plus faibles.

La navigation aérienne commerciale dans cette partie de l'océan Pacifique était devenue un peu plus active après l'ouverture par la compagnie aérienne Air France de la ligne quotidienne Lima-Papeete-Tokyo pour laquelle la protection radiologique a été assurée comme pour les vols Santiago-Île de Pâques-Tahiti de la compagnie aérienne *Lan Chile*.

Différents navires ont continué de croiser dans les parages des sites d'expérimentations après l'avis d'activation des zones dangereuses. Ils ont été prévenus de l'explosion quinze minutes avant chaque essai pour des raisons de sécurité afin que les membres des équipages se protègent éventuellement du flash lumineux.

EUTERPE — Essai n° 30

Date de l'essai : 21 juillet 1973, 9h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 220 m
Énergie : 11 kt



Informations météorologiques

Le 21 juillet, les vents au sol étaient de nord-est, avec une vitesse de 3 à 7 $m.s^{-1}$, et du nord-ouest du 280 à 9 000 m d'altitude avec une vitesse de 28 $m.s^{-1}$.

Au moment de l'essai, le ciel était relativement nuageux.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Une augmentation de la radioactivité de faible niveau a été observée aux îles Gambier 21 heures après l'essai. L'activité volumique journalière associée à l'indice bêta global atmosphérique est passée de 3,7 à 60 $mBq.m^{-3}$. Les dépôts au sol occasionnés par les précipitations était de 96 200 $Bq.m^{-2}$.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Des augmentations de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique correspondant à des retombées différées ont été mesurées sur dix îles :

- Tureia entre le 8 et le 12 août, avec un maximum de 22 $mBq.m^{-3}$ le 10 août ;
- Reao le 7 août avec 22 $mBq.m^{-3}$;
- Hao, du 31 juillet au 3 août et du 9 au 12 août, avec un maximum de 0,13 $Bq.m^{-3}$ le 1er août ;
- Bora Bora, les 3, 6, 7 et 12 août, avec un maximum de 18 $mBq.m^{-3}$ le 6 août ;
- Hiva Oa, du 2 au 6 août, avec 0,44 $Bq.m^{-3}$ le 4 août ;
- Raivavae, le 9 août avec 18 $mBq.m^{-3}$;
- Rangiroa, les 2, 5, 6 et 12 août, avec un maximum de 0,296 $Bq.m^{-3}$ le 6 août ;
- Tubuai, les 9 et 10 août, avec un maximum de 11 $mBq.m^{-3}$ le 9 août ;
- Mahina (Tahiti), les 12 et 13 août, avec un maximum de 55 $mBq.m^{-3}$ le 13 août ;
- Totegegie (Gambier), les 9 et 10 août, avec un maximum de 22 $mBq.m^{-3}$ le 10 août.

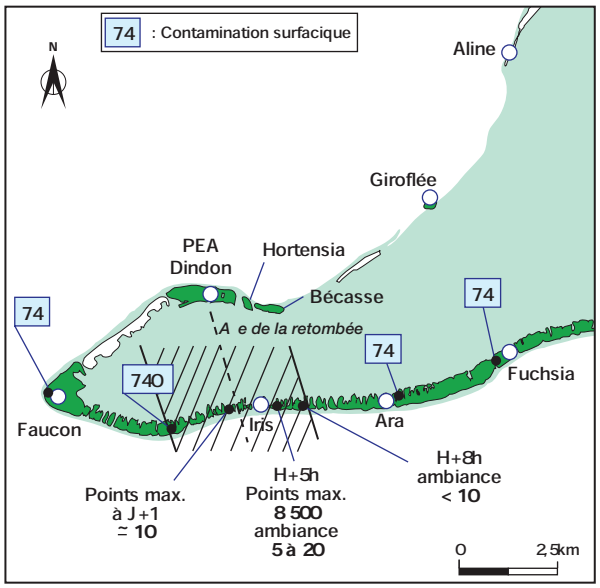


FIG. 259. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) et contamination surfacique ($Bq.m^{-2}$) dans le secteur Ouest de l'atoll de Mururoa.

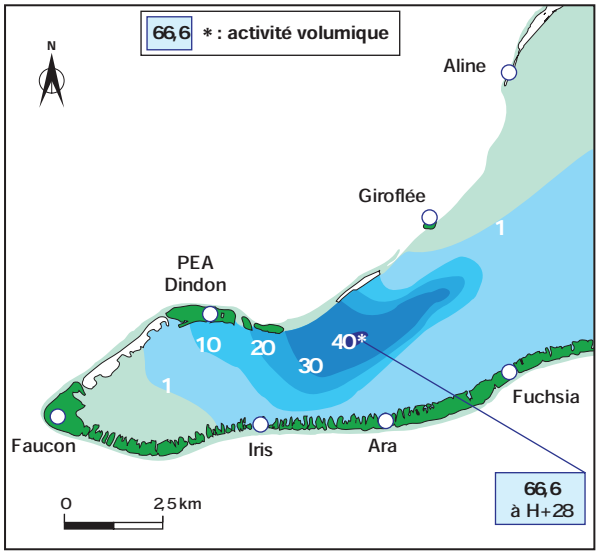


FIG. 260. - Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 mètre et activité volumique ($MBq.m^{-3}$) dans le secteur Ouest des l'atoll de Mururoa à H+25h30 à H+28h30 (mission LCPS).

MELPOMÈNE Essai n° 31

Date de l'essai : 28 juillet 1973, 14h06 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 270 m
Énergie : 0,05 kt



Informations météorologiques

Le 28 juillet, le vent au sol était du 120, avec une vitesse comprise entre 5 et 10 $m.s^{-1}$. Il s'affaiblissait nettement entre 1 000 et 3 000 m d'altitude et se renforçait au-delà en s'infléchissant progressivement vers l'axe sud-ouest. La situation générale était assez complexe, ce qui a entraîné un retour de masses d'air contaminées. Au moment de l'essai, le ciel était presque totalement dégagé.

Une double tropopause se situait aux altitudes de 10 800 m et 14 700 m.

Informations sur l'essai

La base du nuage était à 1 800 m d'altitude et sa tête atteignait 2 300 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Une augmentation de la radioactivité atmosphérique a été détectée à Tematangi, 6 heures après l'essai. Les dépôts au sol ont été négligeables.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Des augmentations de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique correspondant à des retombées tardives ont été mesurées sur quatre îles :

- Tureia, du 30 juillet au 2 août, avec une activité maximale de 3,25 $Bq.m^{-3}$;
- Totegegie, où l'activité a atteint un maximum de 0,26 $Bq.m^{-3}$ le 31 août ;
- Reao, avec une augmentation atteignant 0,0185 $Bq.m^{-3}$ le 2 août ;
- Tahiti, avec 0,037 $Bq.m^{-3}$ à Mahina et 0,1 $Bq.m^{-3}$ à Taravao le 3 août.

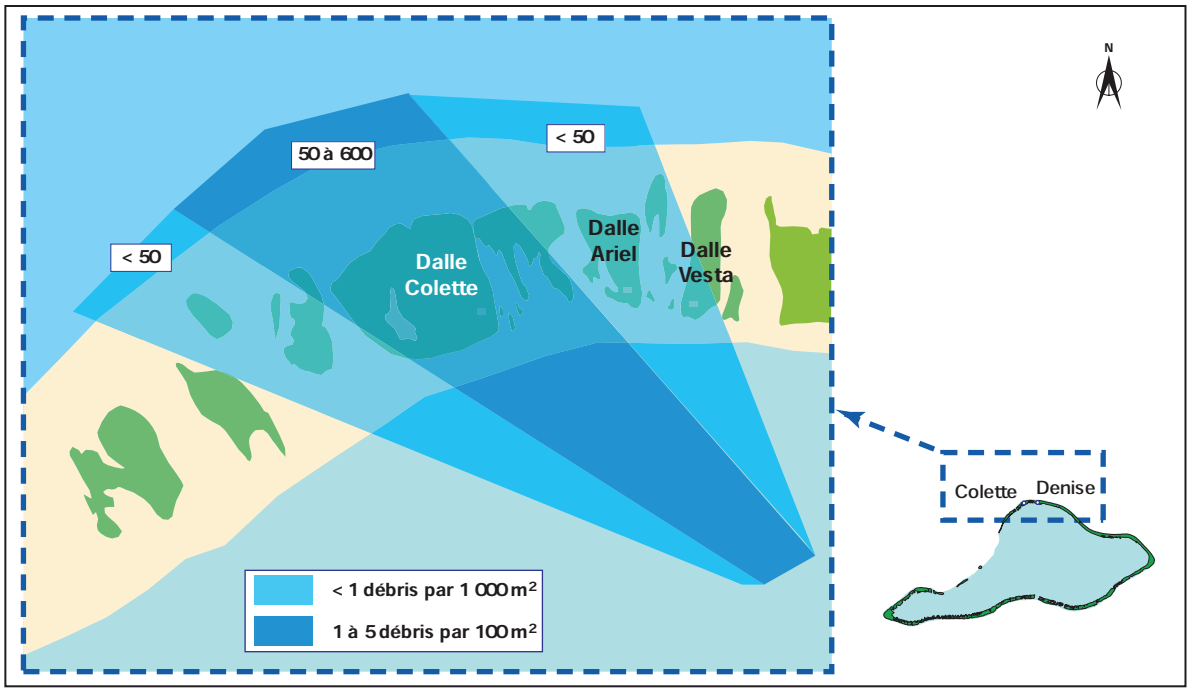


FIG. 261. - Débit de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) dans le secteur Nord de l'atoll de Mururoa (mission RAD 3-reconnaissances terrestres).

PALLAS Essai n° 32

Date de l'essai : 18 août 1973, 9h15 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 270 m
Énergie : 4 kt



Informations météorologiques

Le 18 août, les vents au sol étaient du sud est, assez forts jusqu'à 1 000 m, atteignant 14 $m.s^{-1}$. Entre 1 000 et 6 000 m d'altitude, ils étaient très faibles et variables en direction. Entre 6 000 et 7 000 m d'altitude, le vent était d'ouest (260) avec une vitesse de 17 $m.s^{-1}$.

Au moment de l'essai, le ciel était très couvert. La tropopause se situait à une altitude de 15 000m.

Informations sur l'essai

La base du nuage se situait à 1 800 m et son sommet à 5 500 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Des augmentations de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique correspondant ont été détectées sur quatre îles :

- Hereheretue les 19 et 20 août, avec un maximum de 1,2 $Bq.m^{-3}$;
- Raivavae, du 19 au 21 août, avec un pic à 111 $Bq.m^{-3}$;
- Tubuaï avec un maximum de 111 $Bq.m^{-3}$;
- Tahiti avec des activités maximales de 0,55 $Bq.m^{-3}$ et de 0,92 $Bq.m^{-3}$ respectivement à Mahina et Taravao, le 21 août.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Plusieurs augmentations de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique correspondant à des retombées différées ont été détectées à Tureia les 25, 26 et 28 août avec un niveau maximum de 0,011 $Bq.m^{-3}$; ainsi qu'à Totegegie les 23, 24, 28 et 29 août, avec 0,022 $Bq.m^{-3}$.

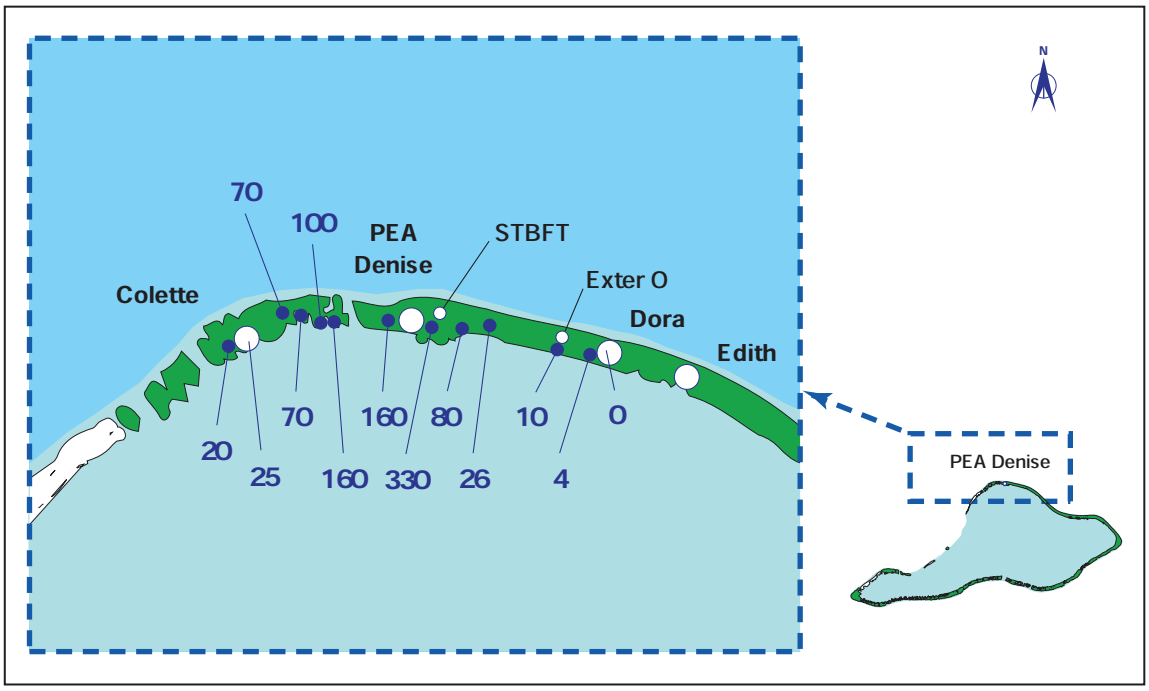


FIG. 262. -Débits de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) mesuré à 1 mètre au-dessus du sol dans le secteur Nord de l'atoll de Mururoa entre H+5h15 et H+8h20 (mission TER).

PARTHÉNOPE Essai n° 33

Date de l'essai : 24 août 1973, 9h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 220 m
Énergie : 0,2 kt



Informations météorologiques

Le 24 août, les vents au sol étaient d'est (entre 80 et 95°), avec une vitesse de 6 à 9 $m.s^{-1}$ et restaient sensiblement alignés en altitude jusqu'à 3 000 m, avec une vitesse de 18 $m.s^{-1}$. Au moment de l'essai, le ciel était dégagé et les vents bien établis.

La tropopause se trouvait à 15 300 m d'altitude.

Informations sur l'essai

Le pied du nuage s'élevait à 1 400 m d'altitude et sa tête à 2 500 m.

Îles et atolls habités concernés par les retombées immédiates

Une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique a été mesurée le 26 août à Raivavae et, du 24 au 27 août, à Tubuai.

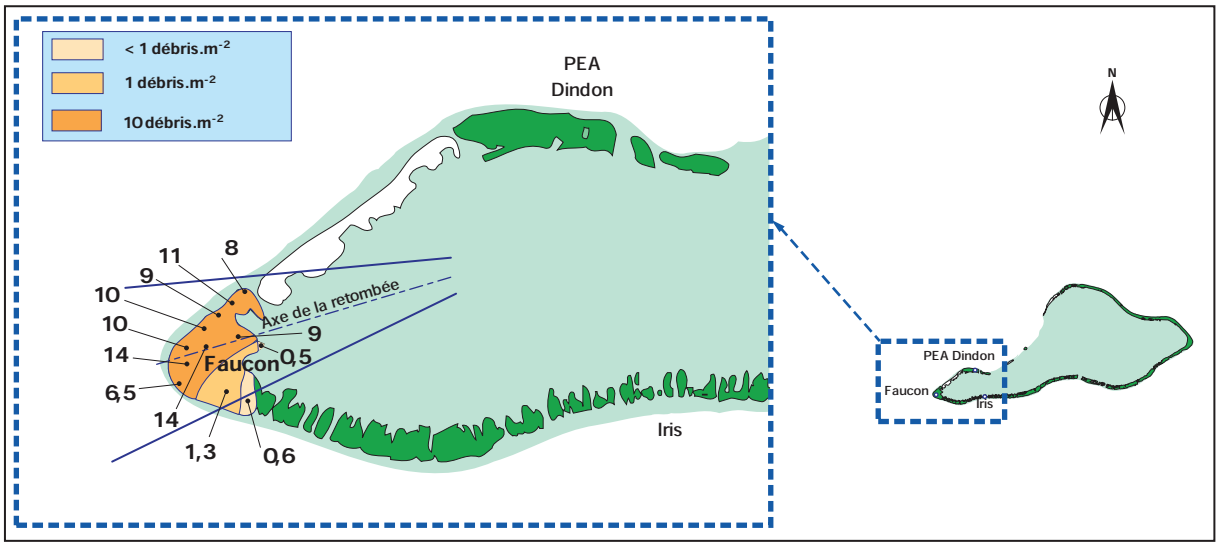


FIG. 263. -Débits de dose ($mGy.h^{-1}$) mesuré à 1 mètre au-dessus du sol dans le secteur Ouest de l'atoll de Mururoa et densité des débris récupérés.

TAMARA — Essai n° 34

Date de l'essai : 28 août 1973, 9h30 (heure locale)
Type d'essai : largage par avion Mirage III E
Site : océan intérieur des eaux territoriales
Altitude : 250 m
Énergie : 6 kt



Informations météorologiques

Le 28 août, les vents au sol étaient de sud-est, du 130 au 140, entre 0 et 1 000 m d'altitude, avec une vitesse de 13 m.s-1 ; faiblissant jusqu'à 3 000 m, altitude où leur vitesse était presque nulle. Entre 10 000 et 15 000 m d'altitude, les vents passaient au sud-ouest (du 210 au 250), avec des vitesses de 15 à 26 $m.s^{-1}$. Au moment de l'essai le ciel était couvert.

Informations sur l'essai

L'essai consistait à larguer une arme de faible énergie à partir d'un mirage III E qui avait décollé de l'atoll de Mururoa. Les distances de sécurité étaient de 9 milles nautiques pour les navires opérationnels avec hélicoptères, de 16 milles nautiques pour les bâtiments bases et de 8 milles nautiques pour les avions en vol à 6 000 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Une augmentation de l'activité volumique atmosphérique de faible niveau a été détectée entre le 28 et le 30 août à Tureia, Hao, Reao, Tahiti (Mahina et Taravao) et Rangiroa.

CAMPAGNE 1974

La campagne 1974 a concerné neuf essais atmosphériques dont six sous ballon, un essai par largage d'avion Jaguar et deux essais de sécurité sur tour. Les essais ont été réalisés entre le 16 juin et le 14 septembre. Les conditions météorologiques, anormalement stationnaires pour l'hiver austral, ont entraîné plusieurs jours d'attente jusqu'à ce qu'elles soient favorables à la réalisation de l'essai. Le décalage des dates d'essais a réduit à l'extrême la période de temps entre les séries.

L'activation du Goen a été effective entre le 10 mai et le 19 septembre. Les avis concernant l'activation des zones maritimes et aériennes dangereuses et de sécurité ont été émis à compter du 11 juin. Elles ont été désactivées le 17 septembre.

L'énergie prévue de certains essais était supérieure à celle de ceux de 1973, mais l'expérience acquise lors des essais précédents a conduit à ne pas modifier les dimensions des zones maritimes et aériennes dangereuses et de sécurité. En effet :

- Le risque dû au flash défini suivant le critère le plus contraignant de visibilité directe de la boule de feu était identique.
- Le risque radiologique pour les avions des lignes commerciales a été évité par des accords de déroutement passés avec les compagnies aériennes (Air France et *Lan Chile*).

Aucune retombée significative n'a été détectée sur la Polynésie à l'exception de celles mesurées sur les îles de l'archipel de la Société à la suite de l'essai Centaure. L'abri de prévoyance de Rikitea dans l'archipel des Gambier n'a pas été utilisé en 1974. Seuls les blockhaus de Tureia ont été maintenus en état de fonctionnement.

CAPRICORNE — Essai n° 35

Date de l'essai : 16 juin 1974, 8h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 220 m
Énergie : 4 kt



Informations météorologiques

L'essai a été effectué le 16 juin, sur la face nord-ouest d'un anticyclone centré entre les îles Pitcairn et de Pâques. Les vents, jusqu'à une altitude de 3 000 m étaient du nord-est de vitesse de 5 à 8 $m.s^{-1}$ et au-dessus de nord-ouest à ouest de 8 à 13 $m.s^{-1}$.

Des nuages cumuliformes, limités à 1 500 m d'altitude en raison d'une faible inversion, induisaient de faibles risques de pluie.

Informations sur l'essai

La tête du nuage a culminé à 6 900 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Aucune retombée directe n'a été détectée.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Une augmentation de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique de faible niveau due à des nuages dérivés du nuage principal a été détectée à Papeete à partir du 20 juin, avec une valeur maximale enregistrée le 21 juin.

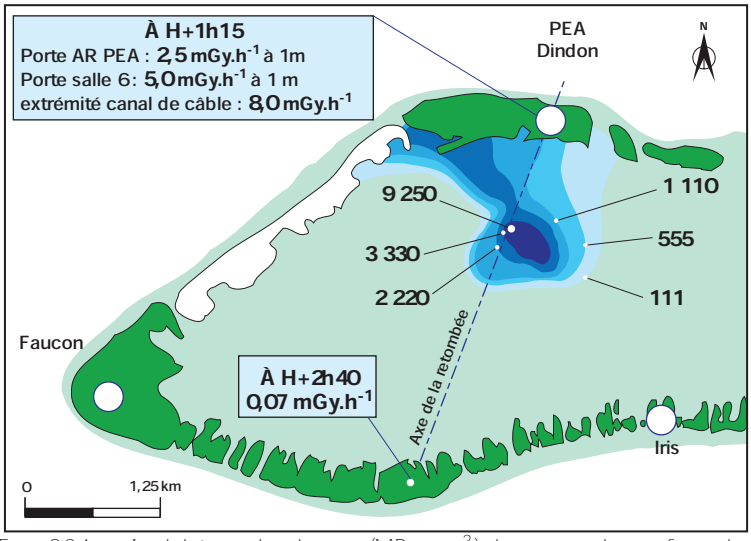


FIG. 264. - Activités volumiques ($MBq.m^{-3}$) des eaux de surface du lagon entre H+2 et H+4 et débit de dose ($mGy.h^{-1}$) du secteur Ouest de l'atoll de Mururoa.

GÉMEAUX — Essai n° 36

Date de l'essai : 7 juillet 1974, 14h15 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 312 m
Énergie : 150 kt



Informations météorologiques

Le 7 juillet, l'essai Gémeaux a été effectué sur la face nord-ouest d'une cellule anticyclonique centrée en 27° S et 125° W. Les vents de basse couche jusqu'à 4 500 m d'altitude étaient de secteur nord-est à est-nord-est.

À partir de 5 000 m, ils s'orientaient à l'ouest. Les vitesses étaient de 8 à 10 $m.s^{-1}$, jusqu'à 10 000 m ; se renforçant et atteignant 31 à 41 $m.s^{-1}$, à partir de cette altitude.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé à H+15min culminait à 15 240 m, sa base se situait à 10 668 m. Le nuage s'est fractionné en s'inclinant vers l'est, le pied s'est détaché du sol et un cumulus blanc s'est formé à la base de ce dernier.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

La seule retombée directe a été mesurée sur des atolls inhabités à l'est de l'atoll de Mururoa.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Des augmentations de l'activité volumique associée à l'indice bêta global atmosphérique correspondant à des retombées différées de faible niveau ont été détectées entre le 14 et le 16 juillet sur différents atolls, ainsi qu'à Tahiti.

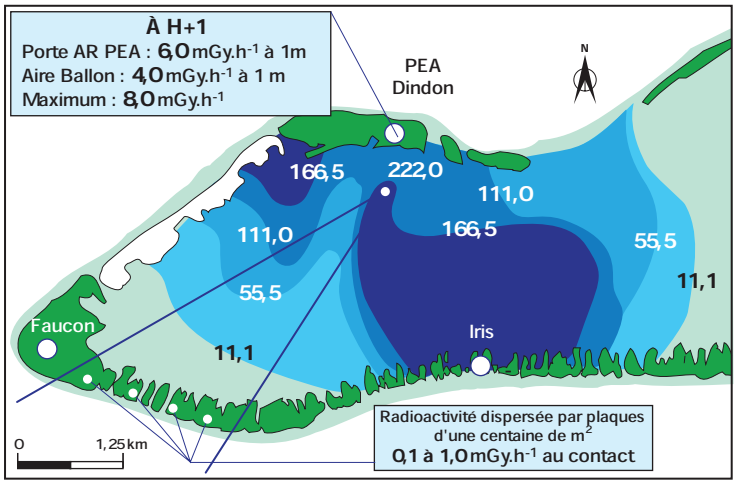


FIG. 265. - Activités volumiques ($MBq.m^{-3}$) des eaux de surface du lagon entre H+42h45 et H+45h30 et débit de dose ($mGy.h^{-1}$) du secteur Ouest de l'atoll de Mururoa.

CENTAURE — Essai n° 37

Date de l'essai : 17 juillet 1974, 8h00 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 270 m
Énergie : 4 kt



Informations météorologiques

Le 17 juillet, l'essai a été effectué sur la face nord d'une cellule anticyclonique en voie d'affaiblissement centrée sur l'atoll de Morane, avec des vents de basse couche de secteur sud-est de 5 $m.s^{-1}$, tendant à faiblir durant la journée.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé, à H+10min, de couleur ocre s'est détachée du pied. Le sommet du pied a bourgeonné en formant une petite tête blanche cerclée d'un anneau ocre. La tête du nuage a culminé à 5 200 m, altitude nettement plus basse que celle attendue par la prévision.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

La seule retombée directe est observée sur l'atoll de Tematangi.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Le nuage radioactif s'est dirigé vers Tahiti qui est touchée, le 19 juillet, par la côte Est. Des précipitations de forte intensité, conjuguées aux effets du relief, conduisirent à des dépôts au sol hétérogènes en termes d'activités surfaciques à Hitiaa sur le plateau de Taravao et au sud de Teahupoo.

➞ Les détails de l'évaluation des conséquences radiologiques de l'essai Centaure pour la population et l'environnement de Tahiti sont présentés dans le chapitre VI.

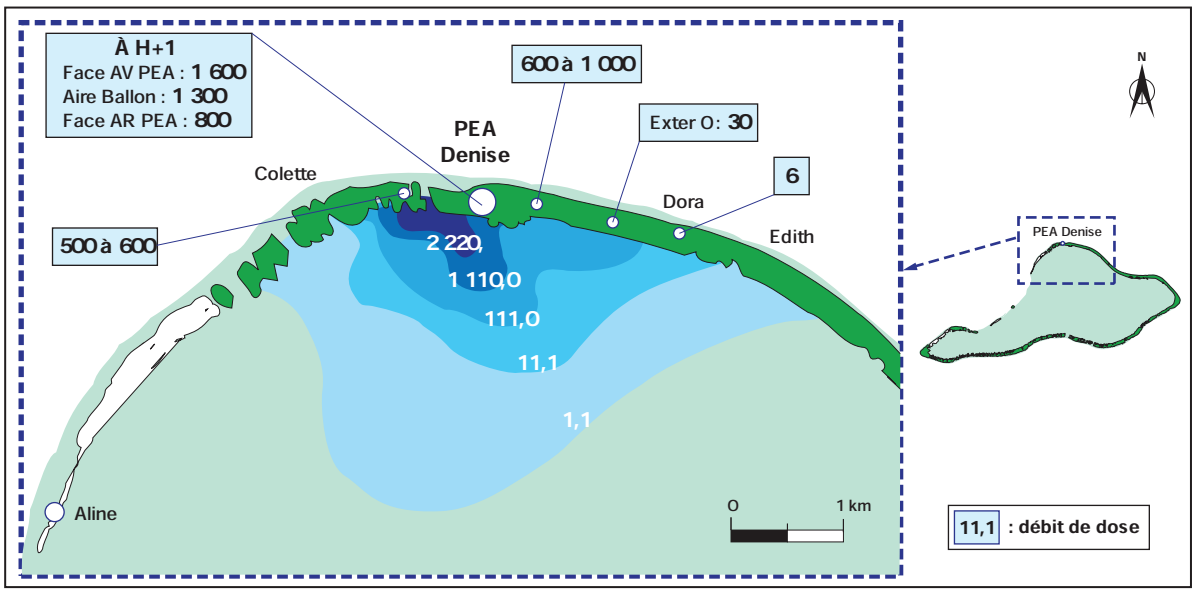


FIG. 266. - Activités volumiques ($MBq.m^{-3}$) des eaux de surface du lagon entre H+2h15 à H+4h00 et débit de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) du secteur Ouest de l'atoll de Mururoa entre H+1 et H+1h20 (mission TER 1).

MAQUIS Essai n° 38

Date de l'essai : 25 juillet 1974, 8h30 (heure locale)
Type d'essai : largué par avion Jaguar
Site : au dessus océan – 20 km Sud-Ouest de Mururoa
Altitude : 250 m
Énergie : 8 kt



Informations météorologiques

Le 25 juillet, le tir Maquis a été effectué sur la face nord-ouest d'un anticyclone centré à 450 milles nautiques, au sud-est de l'île de Pitcairn. Le matin de l'essai, les vents étaient de nord-est faibles, de 5 à 7 $m.s^{-1}$. L'influence anticyclonique s'est fait sentir jusqu'à 4 000 m avec un flux de composante nord-est à nord-nord-est faible. Entre 5 000 m et 8 000 m d'altitude, les vents étaient à composante ouest nord-ouest, avec des vitesses qui atteignaient 12 $m.s^{-1}$. Au-dessus de 8 000 m, ils étaient de secteur sud-ouest et leurs vitesses étaient très élevées, avec un maximum de 43 $m.s^{-1}$ à 12 500 m. Le ciel était peu nuageux.

Informations sur l'essai

La tête du nuage a culminé à 10 700 m d'altitude. À H+9min, elle s'étirait sur 5 km dans l'axe du vent, un anneau rouge-orange apparaissait à sa base, à l'altitude de 9 000 m. Le pied formait une colonne bourgeonnante dont le sommet se situait aux environs de 3 000 m. Il s'est confondu petit à petit avec les cumulus environnants.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Aucune variation du bruit de fond radioactif n'a été détectée et aucune retombée directe n'a été constatée sur les îles habitées de Polynésie française.

SCORPION — Essai n° 39

Date de l'essai : 14 août 1974, 15h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 312 m
Énergie : 96 kt



Informations météorologiques

Le 14 août, l'essai Scorpion a été effectué sur la face nord-ouest d'une profonde dépression centrée sur le 40° S et le 130° W, entraînant un flux de sud-ouest sur le sud des Tuamotu et des îles Gambier. Sur l'atoll de Mururoa, ce flux de sud-ouest se renforçait en altitude, sa vitesse passant graduellement de 9 $m.s^{-1}$ au sol, à 21 $m.s^{-1}$ à 4 000 m, 31 $m.s^{-1}$ à 6 000 m et 38 $m.s^{-1}$ à 11 000 m d'altitude. Le ciel était peu nuageux et les risques d'averses faibles.

Informations sur l'essai

La tête du nuage stabilisé, à H+5min, était de couleur blanche avec une tache orange foncé à sa base. Des nuages lenticulaires se sont formés à son sommet et le pied s'est détaché pour n'être plus relié à la tête que par une zone ocre transparente. À H+10min, la tête avait pris la forme d'une enclume blanche avec une base ocre foncé. La tête du nuage culminait à 17 500 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Aucune retombée directe sur une île habitée n'a été constatée.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Une augmentation de l'activité volumique atmosphérique correspondant à des retombées différées de faible niveau a été détectée à Reao, le 15 août, entre 3 et 6 h du matin.

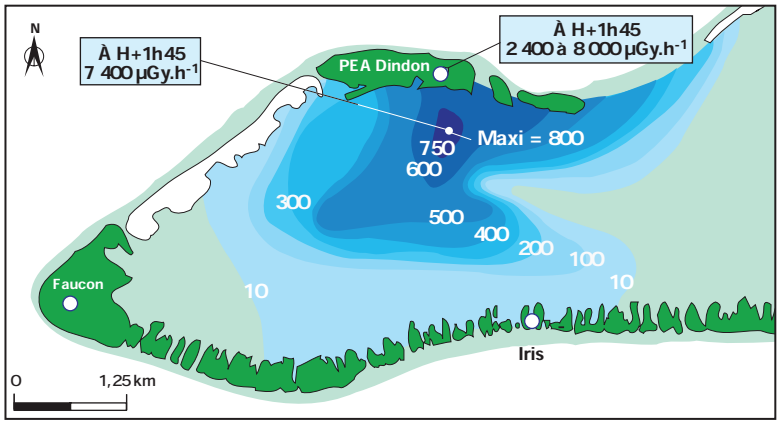


FIG. 267. - Débit de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) à 1 m au-dessus de la surface du sol et des eaux du secteur Ouest de l'atoll de Mururoa entre H+18h00 et H+20h00.

TAUREAU — Essai n° 40

Date de l'essai : 24 Août 1974, 14h45 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Denise
Altitude : 270 m
Énergie : 14 kt



Informations météorologiques

Le 24 août, l'essai Taureau a été effectué sur la face sud-est d'un anticyclone faible, à l'arrière d'une perturbation active, qui a touché l'atoll de Mururoa dans la nuit du 22 au 23 août. Des vents faibles étaient alors orientés au sud, puis sud-est.

L'arrivée d'une petite perturbation dans la nuit du 23 au 24 août a provoqué une orientation des vents au sud-ouest, puis ouest, avec un léger renforcement au cours de la journée du 24 août.

Sur l'atoll de Mururoa, au moment de l'essai, les vents étaient donc sensiblement alignés, entre le 260 et le 280, du sol jusqu'à 10 000 m avec des vitesses qui augmentaient régulièrement avec l'altitude, passant de 5 $m.s^{-1}$ jusqu'à 1 000 m, à 15 $m.s^{-1}$ à 4 000 m et à 41 $m.s^{-1}$ au-dessus de 8 000 m.

Informations sur l'essai

La tête du nuage à H+4min atteignait 9 753 m, en s'éloignant dans le 80. Le pied est resté en arrière et a pris la forme d'un gros cumulus blanc bourgeonnant. À H+10min, le début de cisaillement de la tête et du pied a été observé. La tête du nuage à la stabilisation atteignait l'altitude de 10 000 m.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Une retombée de faible niveau a été détectée sur l'archipel des Gambier, avec un niveau maximal mesuré 18 heures après l'essai.

Îles et atolls concernés par les retombées différées

Une augmentation de l'activité volumique atmosphérique correspondant à des retombées différées a été observée suite à des précipitations ayant eu lieu 4 jours après l'essai, sur les atolls de Tureia et Reao.

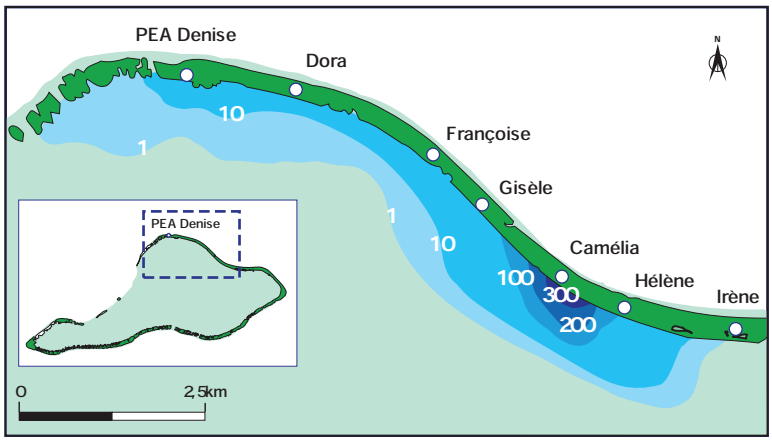


FIG. 268. - Débit de dose ($\mu Gy.h^{-1}$) mesuré à 1 m au-dessus de la surface dans le secteur Nord de l'atoll de Mururoa entrer H+2h15 et H+3h30.

VERSEAU Essai n° 41

Date de l'essai : 14 septembre 1974, 14h30 (heure locale)
Type d'essai : sous ballon
Site : Mururoa – Zone Dindon
Altitude : 433 m
Énergie : 332 kt



Informations météorologiques

Le 14 septembre, l'essai Verseau a eu lieu sur la face nord-est d'un anticyclone centré au sud-ouest de Rapa et au nord-ouest d'une dépression qui s'était formée le 12 septembre aux alentours de l'atoll de Mururoa. L'instabilité modérée et la turbulence étaient limitées à 2 400 m d'altitude par une forte inversion de température. La rotation des vents entre sud-est et sud sud-ouest se situait également à 2 400 m.

Il n'y avait pas de précipitations prévues aux abords des sites. Au moment de l'essai, les vents au sol (jusqu'à 2 000 m) étaient du 145 de 5 à 8 $m.s^{-1}$, puis du 240-250 avec des vitesses de 10 $m.s^{-1}$ entre 3 000 et 6 000 m, de 15 à 26 $m.s^{-1}$ de 6 000 à 18 000 m et chute à 6 $m.s^{-1}$, aux altitudes supérieures.

Informations sur l'essai

La tête du nuage a culminé à 19 000 m d'altitude.

Îles et atolls concernés par les retombées immédiates

Des augmentations de l'activité volumique atmosphérique correspondant à des retombées directes de très faible niveau ont été observées, à 8 heures après l'essai, à Tureia et Reao.

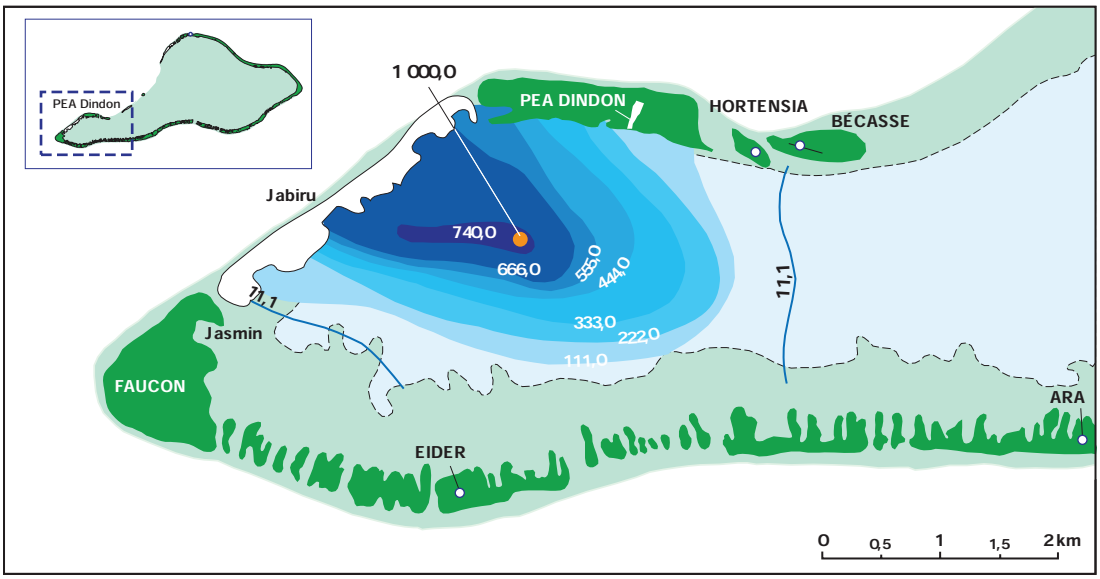


FIG. 269. - Activité volumique (MBq.m^{-3}) des eaux de surface du secteur Ouest de l'atoll de Mururoa mesurée 1 jour après l'essai.

ANNEXE 4

Organisation associée à la réalisation des essais nucléaires

Les essais nucléaires français ont été réalisés dans le cadre d'une étroite collaboration entre le ministère de la Défense et le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), les responsabilités de chacun étant clairement réparties par différents textes réglementaires.

Chargé de la conception et de la fabrication des armes nucléaires françaises, le CEA était responsable du volet expérimental des essais nucléaires, c'est-à-dire de la fabrication des engins à tester, de la préparation et de l'exécution des essais, ainsi que de l'exploitation scientifique de leurs résultats. Depuis le 12 septembre 1958, les activités du CEA liées à la défense nationale relèvent de la Direction des applications militaires (DAM).

Le ministère de la Défense assurait la responsabilité globale des opérations et, en particulier, veillait à ce que les essais nucléaires soient réalisés dans le respect des règles de sécurité, pour les expérimentateurs comme pour les populations polynésiennes. Les règles de sécurité radiologique, en particulier, étaient définies par la Commission consultative de sécurité (CCS) présidée par le Haut-Commissaire à l'énergie atomique. Cette commission a été remplacée en 1982 par la Commission de sécurité des sites d'expérimentations (C2S). Les règles de radioprotection étaient établies en conformité avec les recommandations internationales de radioprotection édictées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Elles étaient soumises à l'approbation du Comité interministériel des sites lointains (CISL) que présidait le Premier ministre.

Les bases de l'organisation du CEP ont été établies dès 1964 grâce à l'expérience acquise lors du fonctionnement des sites d'expérimentations sahariens de Reggane et In Ecker. Elles ont perduré moyennant quelques aménagements, durant toute la durée d'exploitation des sites du Pacifique. Les principales évolutions dans l'organisation du CEP ont résulté du passage des essais souterrains aux essais atmosphériques (cf. Organigrammes 1 et 2). Cette annexe, présente les principales structures de l'organisation mise en place durant toute la durée d'exploitation du CEP et retrace chronologiquement les grandes lignes de son évolution institutionnelle et administrative.

A4.1 - ORGANISATION DU CEP

En 1966, le CEP était composé :

- d'une base arrière située à Tahiti regroupant le commandement et le soutien militaire, les laboratoires du CEA du centre technique de Mahina et le Laboratoire de détection géophysique du CEA implanté à Pamataï ;
- d'une base avancée sur l'atoll de Hao qui assurait le soutien des missions aériennes opérationnelles, le prétraitement des échantillons recueillis dans le nuage suite aux expérimentations atmosphériques, l'entreposage des composants des engins nucléaires à leur arrivée de métropole ;
- des deux atolls d'expérimentations de Mururoa et Fangataufa.

À partir de 1975, avec le passage aux essais souterrains et le transfert des installations vers Mururoa, le centre de Mahina a progressivement perdu sa vocation technique. Quelques années plus tard, il en a été de même des installations à caractère opérationnel de Hao.

A4.1.1 - GROUPEMENT OPÉRATIONNEL DES ESSAIS NUCLÉAIRES

Créé en 1960 pour prendre la direction des premiers essais nucléaires au Sahara, le Groupement opérationnel des essais nucléaires (Goen) était le seul organe de commandement dont la création était antérieure à celle du CEP.

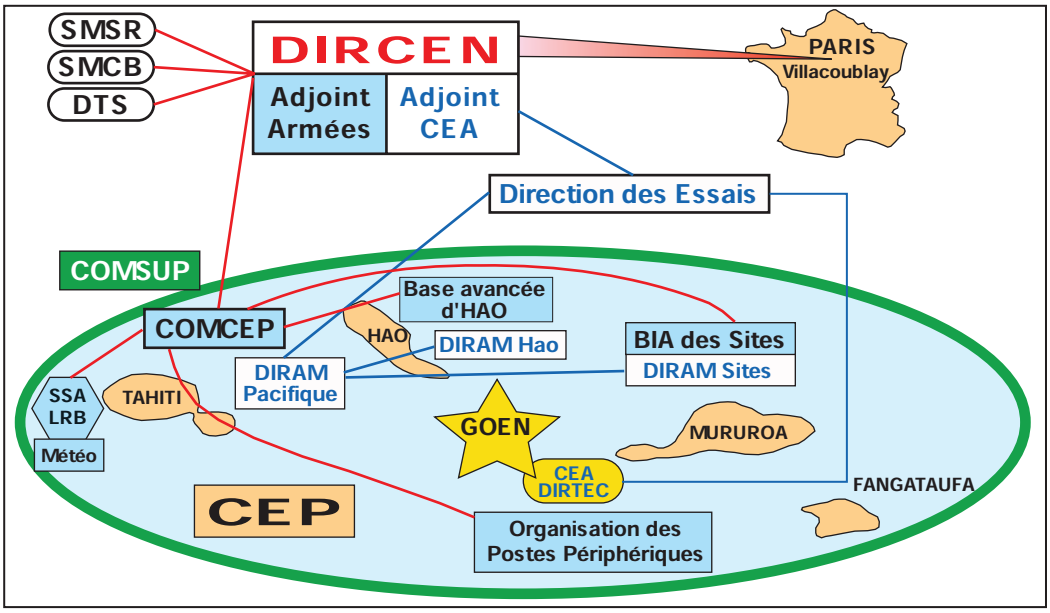
Le Goen était une structure occasionnelle, activée à chaque campagne d'essais. L'officier général commandant le Goen donnait l'ordre d'évacuation des sites avant chaque essai, assurait la gestion des mouvements d'aéronefs et de navires autour des atolls et surtout ordonnait la réalisation de l'essai compte tenu des conditions météorologiques. Enfin, après avoir supervisé les contrôles radiologiques sur zone, c'est lui qui autorisait le retour des équipes après chaque essai (cf. Chapitre VI, § VI.3).

Le commandant du Goen était secondé par le directeur des Essais de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA et était assisté de conseillers scientifiques pour la sécurité radiobiologique, la prévision météorologique et pour la prévention et la protection sanitaires.

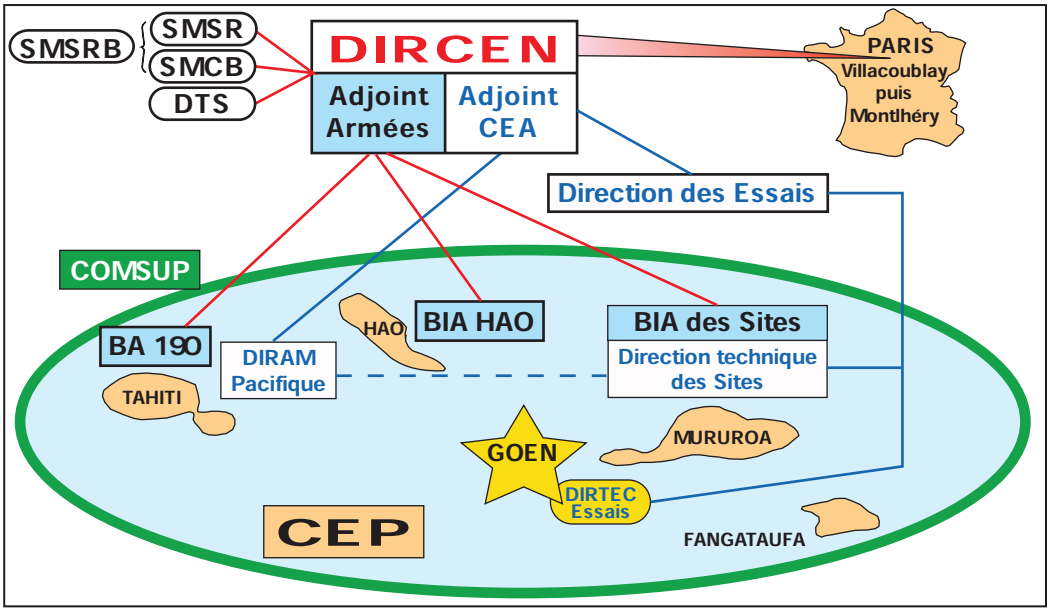
A4.1.2 - COMMANDEMENT TERRITORIAL

L'amiral Commandant supérieur des forces armées dans le Pacifique (Comsup-Alpaci) était le commandant du CEP durant la période des essais atmosphériques. À ce titre, il était le correspondant direct du Directeur des centres d'expérimentations nucléaires (Dircen). Il avait autorité sur les moyens locaux de soutien des expérimentations : bâtiments de la marine nationale, liaisons aériennes inter-insulaires, réseaux de transmissions locaux, moyens du Génie, direction du Service de santé des Armées (SSA) en Polynésie (Hôpital Jean Prince de Tahiti), antennes locales des services spécialisés de la Dircen. Il pouvait, pour certaines campagnes, être désigné par le Dircen pour assurer le commandement du Goen.

En 1986, un arrêté définissant la nouvelle organisation du CEP venait modifier les attributions entre le Dircen et le Comsup qui conservait le commandement territorial sur les installations du CEP dont il devait assurer la protection physique (cf. Organigrammes 1 et 2).



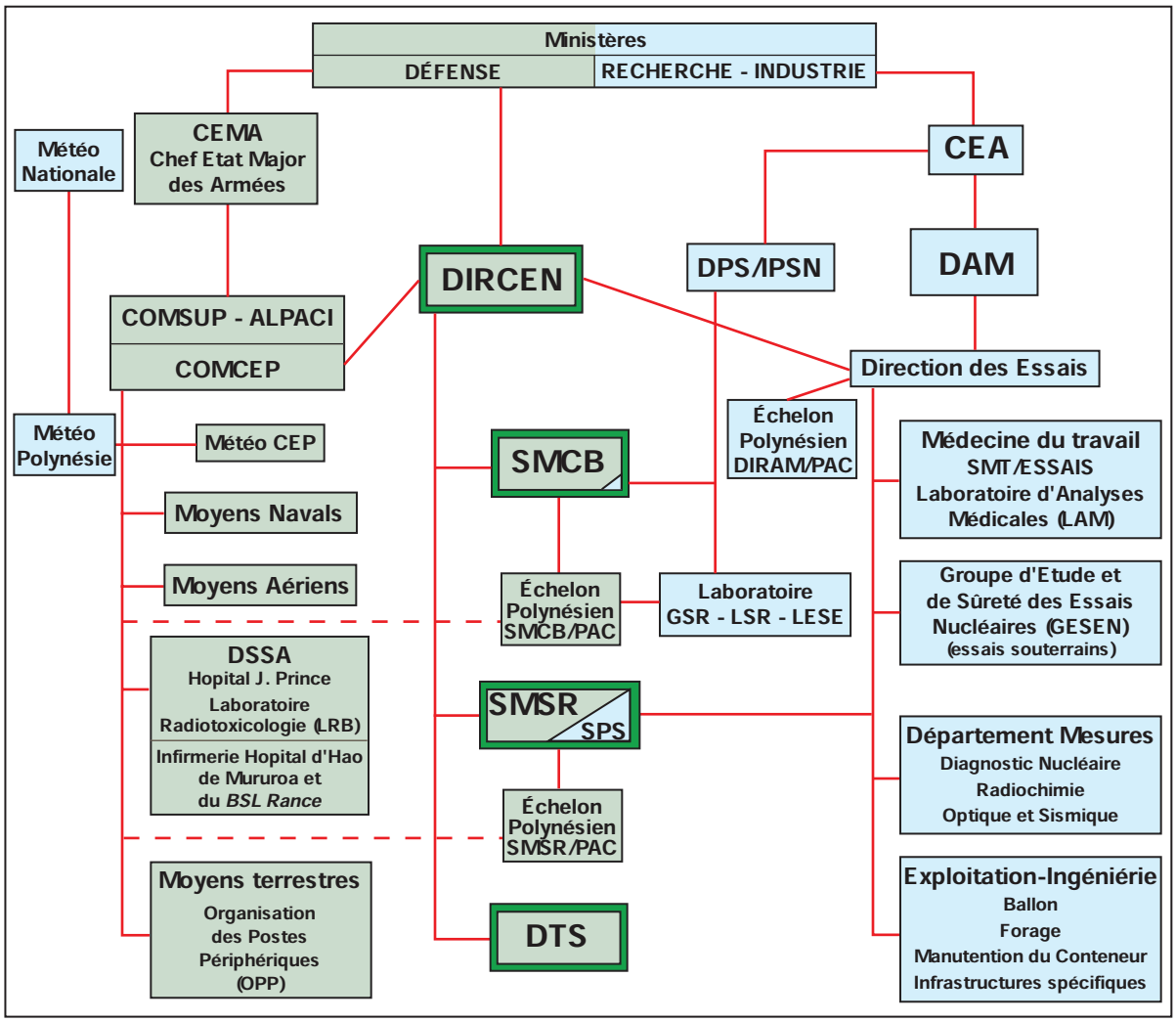
Organigramme 1 : Organisation du CEP pendant la période des essais atmosphériques.



Organigramme 2 : Organisation du CEP pendant la période des essais souterrains.

A4.1.3 - DIRECTION DES CENTRES D'EXPÉRIMENTATIONS NUCLÉAIRES

Créée par un décret du 30 janvier 1964, la Direction des centres d'expérimentations nucléaires (Dircen) était chargée de la conception, de la réalisation et de l'exploitation du CEP. Il s'agissait d'un organisme mixte, Armées-CEA, et interarmées (cf. Organigramme 3). Dépendant directement du ministre de la Défense, la Dircen était dirigée par un officier général, assisté d'un officier général adjoint et du directeur des Essais du CEA/DAM. La conduite des expérimentations restait assurée par le Goen qui était commandé par le Dircen ou un officier général mis à sa disposition.



Organigramme 3 : Positionnement de la Dircen au sein de l'organisation mise en place pour la réalisation des essais.

A partir de 1986, c'est au Dircen qu'il revient d'assurer la direction des organismes de soutien des expérimentations dans le Pacifique : base interarmées des sites et de Hao, base aérienne 190 de Tahiti-Faaa, éléments du CEA implantés à Tahiti, de la météorologie, du SMSR et du SMCB.

La Dircen disposait initialement de trois services : le Service mixte de sécurité radiologique (SMSR), le Service mixte de contrôle biologique (SMCB) et la Direction des travaux et services (DTS). Le SMSR et le SMCB étaient composés de personnel des Armées et du CEA. Il s'agissait de services de surveillance et de contrôle de la radioactivité, en charge de la radioprotection :

- le SMSR avait la responsabilité de la radioprotection des personnes et du suivi de la radioactivité dans le milieu physique (air, eau et sol). À ce titre, il mesurait la radioactivité produite lors des essais et ajustait les modalités de protection. Ce service était également en charge de la dosimétrie du personnel et, le cas échéant, de la décontamination du matériel et du personnel, à l'exclusion de la décontamination fine et de la décontamination des blessés qui dépendaient du SSA.
- le SMCB avait pour mission d'assurer la surveillance radiologique de la biosphère, à l'exclusion de l'être humain qui est de la responsabilité du SSA et de la médecine du travail, y compris des denrées alimentaires et des eaux de boisson, sur l'ensemble de la Polynésie française. Il était chargé de l'évaluation de l'exposition des populations *via* leur alimentation et en particulier de l'exposition par ingestion de produits de la mer qui représentent une part non négligeable de la ration alimentaire des personnes vivant en Polynésie.
- La DTS avait en charge la réalisation et l'entretien des grandes infrastructures de soutien (aérodromes, installations portuaires, routes, usines de dessalement d'eau de mer, hébergement, incinérateur de déchets etc.).

Concernant le SMSR, les fonctions de chef de service et de chef de service-adjoint étaient assurées alternativement par un responsable de la Défense ou du CEA. La direction du service était basée à Montlhéry, en région parisienne, avec une antenne à Tahiti, le SMSR/Pac.

Lors des essais aériens, la composante centrale du SMSR/Pac était implantée dans le centre technique du CEA, à Mahina où se trouvaient les unités de soutien électronique et mécanique et les laboratoires de mesure de la radioactivité et de photo-dosimétrie. Une antenne était installée à Mururoa, le SMSR/Sites, dont les moyens étaient regroupés sur *le BSL Rance* (laboratoires de mesure, locaux de décontamination, etc.) et une autre à Hao qui disposait d'un Centre d'intervention et de décontamination des matériels (CID) et d'un Centre de décontamination des aéronefs et des personnels (CDAP).

Lors du passage aux expérimentations souterraines, les moyens polynésiens du SMSR ont été regroupés à Mururoa où ont été construits une station de décontamination des matériels (Stadec) et un laboratoire de mesures, le L7 (cf. Organigramme 4).

Le SMCB était composé de médecins, pharmaciens et vétérinaires provenant principalement du SSA et de quelques membres du Département de protection sanitaire (DPS) du CEA. Le laboratoire de mesures radioactives du DPS installé à Mahina réalisait des mesures au profit du SMCB. Ce laboratoire s'est successivement appelé : Groupe de surveillance radiologique (GSR), puis Laboratoire de surveillance radiologique (LSR) et enfin Laboratoire d'études et de surveillance de l'environnement (Lése).

PÉRIODE DES ESSAIS AÉRIENS	PÉRIODE DES ESSAIS SOUTERRAINS
Échelon Direction	*Échelon Direction*
• Bureau Scientifique (BS) • Bureau Opérations (OPS) – Section Effets Lointains (PEL) – Section Effets Proches (PEP) – Section Etudes Radiologiques (ER) – Section Equipements (EQ)	• Bureau d'Études Générales, Prévisionnel (BEGP) – Section de Radioprotection des Chantiers et Installations (SRCI) – Section Intervention Assainissement et Décontamination (SIAD) – Section Etudes et Surveillance de l'Environnement (SESE) – Section Equipements (SEQ)

Organigramme 4 : Organisation du SMSR pendant la période des essais atmosphériques puis souterrains.

Le chef du SMCB, médecin du SSA, était également le conseiller médical du Dircen. Il était assisté d'un comité scientifique composé de membres du DPS, du SSA, du service biologique et vétérinaire et de personnalités extérieures compétentes dans ce domaine d'activité. D'abord implantée à Villacoublay, la direction du service s'est installée à Montlhéry en août 1974. Le SMCB disposait d'une implantation polynésienne dans le centre technique de Mahina qui sera transférée sur l'atoll de Mururoa quelques années avant la fin de la période des essais souterrains.

Le SMCB disposait en Polynésie d'un bâtiment de recherches océaniques, le *BRO La Coquille*, remplacé en 1973 par un bâtiment de contrôle biologique, le *BCB Marara*.

En 1994, le SMSR et le SMCB ont été regroupés, formant le Service mixte de sécurité radiologique et biologique de l'homme et de l'environnement (SMSRB).

A4.2 - PRINCIPALES STRUCTURES CEA

A4.2.1 - DIRECTION DES ESSAIS

Au sein de la Direction des applications militaires du CEA, la direction des Essais était responsable de la mise en œuvre des essais nucléaires. Elle était composée de plusieurs services spécialisés :

- Le service exploitation, devenu lors des essais souterrains le département Ingénierie, était chargé de l'étude et de la réalisation des installations spécifiques aux essais : ouvrages abritant les appareillages de mesure, nacelles supports d'engins, ballons, etc.
- Les services du diagnostic nucléaire (DN), de la radiochimie (RC) des effets extérieurs (EE) et le Laboratoire de détection géophysique (LDG) étaient responsables de la définition, de l'acquisition et du dépouillement des résultats de mesure (neutroniques, gamma, radiochimiques, optiques et sismiques). Ces services formeront par la suite le département Mesures.

- Le Service de protection des sites (SPS) était chargé de la radioprotection dans l'environnement proche du point zéro de l'essai et lors de la mise en œuvre de l'engin. Ce service développait les appareils tropicalisés pour la mesure de la radioactivité adapté au climat polynésien (climat chaud, humide et salin) afin de permettre la réalisation de mesures de radioprotection dans des conditions environnementales beaucoup plus sévères que celles rencontrées habituellement dans les centres métropolitains du CEA. Son personnel était issu des Services de protection radiologique des centres du CEA. Le SPS a été intégré au SMSR en 1964
- Le Service médical du travail (SMT/Essais) était chargé de l'ensemble de la médecine du travail des agents du CEA. Il bénéficiait d'une double implantation, en métropole, sur le centre du CEA/DAM de Bruyères-le-Châtel et, en Polynésie, sur le centre CEA de Mahina à Tahiti pendant la période des essais atmosphériques, puis sur l'atoll de Mururoa pour la période des essais souterrains. La médecine du travail disposait, sous la responsabilité de pharmaciens, de laboratoires spécialisés, les Laboratoires d'analyses médicales (Lam) chargés de tous les examens médicaux : analyses de sang, d'urines, radiographies pulmonaires et anthropogammamétries. Ces laboratoires, placés au plus près du médecin du travail, avaient une double implantation, métropolitaine et polynésienne.

A4.2.2 - DIRECTION DES APPLICATIONS MILITAIRES AU PACIFIQUE

Dès son implantation en Polynésie, le CEA a créé la Direction des applications militaires au Pacifique (Diram/Pac), un échelon local de coordination dont l'implantation principale était le centre technique de Mahina. Cette structure a été amenée à jouer un rôle important dans la mise en place et l'entretien des moyens opérationnels. Pendant toute la période des essais aériens, son directeur, le Diram/Pac, était l'adjoint CEA du Comsup. À la fin des essais atmosphériques, l'activité opérationnelle du centre de Mahina s'est interrompue, pour n'être plus qu'administrative. Le Diram/Pac a conservé le rôle d'interlocuteur du CEA auprès des autorités locales (Comsup, Haut Commissaire de la République, autorités politiques du Territoire). De plus, il continuait d'assurer le suivi du personnel de recrutement local.

A4.3 - CHRONOLOGIE DE L'ORGANISATION INSTITUTIONNELLE

18 octobre 1945 : L'ordonnance n° 45-2563 crée le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), placé sous le contrôle direct du Premier ministre et chargé de «*poursuivre les recherches scientifiques et techniques en vue de l'utilisation de l'énergie atomique dans les divers domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale*». Cette ordonnance a par la suite été modifiée à plusieurs reprises, par les décrets n° 70-878 du 29 septembre 1970 concernant son organisation et son rattachement au ministre du développement industriel et scientifique, n° 72-1158 du 14 décembre 1972 et 82-734 du 24 août 1982 concernant les attributions du comité de l'énergie atomique. Elle est aujourd'hui intégrée dans le Code de la Recherche sous les articles L. 332-1 à 7.

2 janvier 1952 : Création du Commandement des armes spéciales (Armée de terre) qui deviendra interarmées (CIAS) par une décision de juillet 1957.

Décembre1954 : Création au CEA d'un Bureau d'études générales (BEG) chargé d'étudier les applications militaires de l'énergie atomique, devenant en mai 1956 le Département des techniques nouvelles.

20 mai 1955 : premier protocole CEA-Défense.

13 février 1956 : Création d'un groupe mixte des expérimentations spéciales pour l'étude des questions liées aux premières expérimentations nucléaires.

18 mars 1957 : Création du groupe mixte Armées-CEA ayant pour mission d'instruire les questions relatives à l'exécution des programmes d'armement nucléaire.

6 janvier 1958 : Création de la Commission consultative de sécurité (CCS) chargée d'étudier les conditions de sécurité relatives aux essais nucléaires afin de parvenir à :

- «*un degré de sécurité jugé nécessaire et suffisant pour les participants aux essais,*
- *un degré de sécurité jugé nécessaire et suffisant pour les populations et biens de toute nature situés dans les régions extérieures au champ de tir et en particulier voisines de celles-ci*».

Cette commission était présidée par le Haut-Commissaire à l'énergie atomique. Sa composition a été modifiée par les décisions du 20 novembre 1961 et du 25 juin 1979.

1er Février 1958 : Officialisation de la création du Commandement interarmées des armes spéciales (Cias), organisme du ministère de la Défense chargé d'organiser les premiers essais réalisés au Sahara, puis l'implantation du CEP.

Septembre 1958 : Création de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA qui succède au Département des techniques nouvelles.

21 septembre 1962 : La décision de création du Centre d'expérimentation du Pacifique (CEP) et du Comité interministériel des sites lointains (CISL) est prise en conseil de Défense. Le CISL dont les attributions font l'objet du décret N° 634 du 30 janvier 1964, est chargé de suivre le déroulement des programmes d'expérimentations nucléaires, d'approuver les besoins futurs (nombre et énergie des essais) et d'évaluer d'un point de vue technique et politique la situation des sites d'expérimentations. Les recommandations de la CCS lui sont soumises pour approbation. Il est présidé par le Premier ministre.
La création du CEP est décidée suite aux études menées après la décision du Conseil de Défense du 27 juillet 1962 et formalisée par la décision du 29 août 1962 : «*Le Général commandant interarmées des armes spéciales est chargé de conduire, en liaison avec le CEA/DAM ces études et ultérieurement de réaliser ce centre d'expérimentations qui portera le nom de Centre d'expérimentation du Pacifique (CEP)*».

7 novembre 1962 : Formalisation d'un protocole entre la Délégation ministérielle pour l'armement (DMA) et le CEA relatif à la participation de ce dernier à la préparation des expérimentations dans le Pacifique.

1er juillet 1963 : le CEP est constitué, sous la subordination du Cias.

30 janvier 1964 : parution du décret portant création de la Dircen, Direction des centres d'expérimentations nucléaires, qui remplace le Cias.

8 février 1964 : les atolls inhabités de Mururoa et Fangataufa sont cédés par le Territoire à l'État français par l'arrêté 290 AA/DOM, à la suite des délibérations de la Commission permanente de l'Assemblée Territoriale du 6 février 1964.

8 août 1964 : Par décision du ministre d'État chargé de la recherche scientifique et des questions atomiques et spatiales, il est créé une Commission mixte Armées-CEA de sûreté nucléaire des systèmes d'armes atomiques qui deviendra la Commission mixte de sécurité (CMS) en 1978 et dont la compétence s'étend aux transports des composants des engins nucléaires destinés aux essais.

17 novembre 1965 : Par décision interministérielle «*La mission du Goen/Pacifique qui est constitué pour une durée qui couvre l'ensemble d'une campagne de tirs, consiste à assurer, dans les conditions de sécurité requises, l'exécution du programme d'expérimentations nucléaires décidé par le Gouvernement*». Le Commandant du Goen est assisté de conseillers, pour la sécurité radiologique, le contrôle biologique et la météorologie.

12 février 1968 : Décision de création du Comité mixte des expérimentations nucléaires dont le rôle est de préparer la présentation des programmes d'expérimentations nucléaires au CISL et d'assurer leur cohérence. La présidence est assurée par le Dircen et la vice-présidence par le Directeur des applications militaires du CEA.

20 janvier 1977 : Établissement d'un protocole Dircen-CEA/DAM concernant l'organisation, les missions et le fonctionnement respectif du CEP, de la Direction des applications militaires au Pacifique (Diram/Pac), et des bases du CEP.

2 octobre 1980 : Un décret et un arrêté fixent les attributions et l'organisation de la Direction des centres d'expérimentations nucléaires. Sont en particulier rappelées, sans changements notables, les missions du Goen et des services de sécurité, SMSR et SMCB.

27 octobre 1982 : Création de la Commission de sécurité des sites d'expérimentations nucléaires (C2S). Prenant la suite de la CCS, elle a pour mission d'examiner l'ensemble des dispositions permanentes prévues en vue d'assurer à tout moment la sécurité nucléaire dans la zone des expérimentations et à l'extérieur de celle-ci. Elle est présidée par le Haut-Commissaire à l'énergie atomique et rend compte de ses travaux aux ministres en charge de la Défense et de l'Industrie. Pour fonder ses avis, elle peut s'appuyer sur les travaux de commissions de sécurité particulières, notamment la Commission de sûreté des essais nucléaires (CSEN) du CEA qui, pour chaque engin testé, instruisait le rapport de sûreté qui précisait notamment le maquettage, la recette, le stockage, le montage, la manutention de l'engin et du conteneur ainsi que des installations spécifiques.

23 décembre 1983 : En application de la décision ministérielle n°4551 du 27 octobre 1982, création par le Haut-Commissaire à l'énergie atomique d'un groupe de travail «risque hydraulique» ayant pour mission de fournir à la C2S ses avis sur le risque hydraulique encouru sur les sites et les mesures de sécurité nécessaires pour en limiter les conséquences.

10 mai 1984 : Création du comité scientifique de la Dircen orienté vers l'examen des programmes de radioécologie et de géophysique. Il est ouvert à des personnalités scientifiques pluridisciplinaires issues de l'IPSN, du CNRS, d'Universités, de l'Institut Curie, du Muséum national d'histoire naturelle, etc.

9 décembre 1986 : Un arrêté définit la nouvelle organisation du CEP modifiant les attributions du Dircen et du Commandant supérieur des forces armées de Polynésie française (Comsup).

1er août 1998 : dissolution de la Dircen. Le gardiennage du site passe sous la responsabilité du Comsup.

Septembre 1998 : Création au sein de la DGA, du Département de suivi des centres d'expérimentations nucléaires (DSCEN). Sa mission est d'assurer, en coopération avec le CEA/DAM, le suivi radiologique et géologique du CEP après sa fermeture ainsi que la pérennité des informations concernant le passé radiologique des sites d'expérimentations.

25 août 2000 : un arrêté définit les attributions et l'organisation du DSCEN.

A4.4 - DÉROULEMENT D'UN ESSAI

Cette section propose une description du déroulement des essais sous l'angle de l'organisation permettant d'assurer la sécurité de l'ensemble des personnes résidant sur le site d'expérimentations de Mururoa.

A4.4.1 - PÉRIODE DES ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES

Durant les premières années du fonctionnement du CEP, le personnel travaillant sur les atolls d'expérimentations était hébergé à bord de cinq bâtiments bases amarrés dans le lagon de l'atoll de Mururoa. C'est en 1970 que commencèrent les travaux d'aménagement des zones d'habitation et d'activité dans le secteur Est de l'atoll. Dès 1974, ce secteur devient l'unique lieu de résidence des personnels présents sur les atolls d'expérimentations de Mururoa et Fangataufa.

Lors des essais atmosphériques, tous les personnels, civils et militaires, étaient évacués de l'atoll. Ils étaient embarqués sur les bâtiments bases et autres navires engagés pour la campagne, ou se repliaient par avion sur la base avancée de Hao.

Seuls quelques expérimentateurs demeuraient présents sur site lors de l'essai, protégés à l'intérieur du Poste de commande de tir (PCT), situé en zone Anémone sur l'atoll de Mururoa.

A4.4.1.1 - ÉVACUATION TEMPORAIRE DES SITES

Lorsque l'ensemble du dispositif était techniquement prêt et que les conditions météorologiques étaient favorables au déclenchement de l'essai (cf. Chapitre II) la décision de réaliser l'essai était prise sur la base des dernières estimations des retombées atmosphériques sur les îles et atolls de la Polynésie (cf. Chapitre VI). Dans la soirée du jour précédant l'essai (J-1), il était procédé au dernier stade de la préparation appelé «passage du Rubicon», avec :

- l'embarquement de l'état-major du site sur le *BSL Rance* et des derniers moyens terrestres sur le *TCD Ouragan* ;
- l'évacuation des derniers personnels à terre, par un avion Bréguet vers Hao, à l'exception des équipes Ballon et Amorçage qui réalisaient au dernier moment la mise en configuration de l'engin et pouvaient être amenées à intervenir en cas d'incident, et de l'équipe d'expérimentateurs qui restait dans le PCT durant l'essai ;
- l'appareillage de l'ensemble des bâtiments abritant le personnel du lagon de Mururoa.

Si les conditions météorologiques évoluaient défavorablement, l'essai était différé de quelques heures, d'une journée, voire plus. Dans ce cas, l'ensemble du dispositif revenait à la situation antérieure, dite «Pénélope», qui consistait à descendre le ballon pour remettre l'engin en position de sécurité, dans l'attente de conditions météorologiques favorables permettant de revenir à la situation «passage du Rubicon».

Lorsque les conditions météorologiques étaient favorables, à H–30min le Goen donnait l'ordre au PCT de déclencher la séquence de tir et le compte à rebours automatique était déclenché. Il pouvait être interrompu manuellement ou automatiquement, si les comptes-rendus de l'instrumentation de mesure n'étaient pas satisfaisants.



Ouvrage de béton armé dont l'épaisseur des murs varie de 3 à 5 mètres, le PCT pouvait abriter les expérimentateurs présents sur l'atoll pendant l'essai durant plusieurs jours, si nécessaire.

Au moment de l'essai, par mesure de protection contre les effets mécaniques, thermiques et radiologiques les bateaux étaient positionnés à une distance du point zéro dite «distance de sécurité». Celle-ci dépendait de l'énergie attendue de l'explosion de l'engin, du mode d'expérimentation et des conditions météorologiques. Des précautions étaient prises pour parer aux effets du flash lumineux pouvant être perçu jusqu'à 100 nautiques au niveau de la mer et 200 nautiques pour les aéronefs, sachant que le risque de brûlure rétinienne peut intervenir jusqu'à des distances de l'ordre d'une vingtaine de milles nautiques. Ainsi par précaution, toute personne assistant aux essais depuis le pont des navires devait se protéger du flash lumineux en tournant le dos au point zéro et en plaçant un bras devant les yeux ou en portant des lunettes anti-flash. En 1966, lors des premiers essais, seul un nombre restreint de personnes était autorisé à assister aux expérimentations. Par la suite, le retour d'expériences acquis par la mesure des effets des essais précédents a permis d'alléger les contraintes et les passagers pouvaient assister à l'essai.

En 1973, cette organisation a été quelque peu modifiée par l'installation du poste de commandement du Goen dans un blockhaus situé en secteur Est de Mururoa. Cependant, les personnels continuaient d'être évacués avant l'essai et ne restaient sur l'atoll que les 200 personnes nécessaires à la conduite de l'essai.

A4.4.1.2 - RETOUR SUR SITE

Dans les heures qui suivaient la réalisation d'un essai, les missions de reconnaissance radiologique menées par le Service mixte de sécurité radiologique (SMSR) déterminaient les niveaux de radioactivité dans les principaux lieux où les personnels étaient amenés à intervenir à court terme : lagon, ouvrages bétonnés, chantiers, zone aéroportuaire, etc. Les missions réalisaient un survol général permettant une reconnaissance radiologique de la totalité des deux atolls d'expérimentations. Toutefois, dans un premier temps, cette reconnaissance ne pouvant être exhaustive, les lieux qui n'avaient pas été reconnus finement au plan radiologique étaient, par précaution, classés zones interdites (ZI). En fonction des besoins, ces zones faisaient ensuite l'objet de reconnaissances plus poussées et étaient reclassées en zones surveillées (ZS) ou en zones contrôlées (ZC). Toute intervention dans une ZI se faisait en présence d'un agent de radioprotection du SMSR. Les cartes dressées à partir de ces relevés sont présentées pour chaque essai décrit dans l'annexe 3.

Le retour sur site n'était autorisé par le Goen qu'après contrôle du site par le SMSR. A l'exception de la campagne 1966 durant laquelle les retours sur l'atoll de Mururoa ont été différés jusqu'à plusieurs semaines à la suite des essais sur barge, les activités nautiques étaient autorisées dans la zone Kathie peu après le retour des bateaux au mouillage et, quelques jours après, dans la zone de l'essai. Les zones où ont eu lieu les essais sur barge, ainsi que celles proches du rivage de la zone Colette restaient des zones contrôlées (cf. Chapitre IV).

A4.4.1.3 - SUIVI DOSIMÉTRIQUE

Pendant la période des essais atmosphériques, les modalités de distribution des films dosimètres aux personnes présentes sur site ont évolué en fonction des procédures de réalisation des essais afin d'assurer la meilleure efficacité du suivi radiologique. Les trois premières années de fonctionnement du CEP, par précaution, les films dosimètres mensuels individuels ont été distribués à la quasi-totalité du personnel. Ainsi par exemple, en 1966, lors de la première campagne, 110 000 films ont été distribués et moins de 1% d'entre eux ont présenté une dosimétrie non nulle. En 1968, après les essais mégatonniques, le retour d'expérience du suivi dosimétrique a permis d'identifier et ou de confirmer précisément les fonctions et postes de travail présentant un risque radiologique nécessitant une surveillance radiologique. Ainsi, au cours des années suivantes, cela a conduit à ajuster le nombre de dosimètres individuels attribués systématiquement aux personnes relevant de ces fonctions et postes et d'augmenter ceux disponibles à l'entrée des différentes zones contrôlées pour les personnes devant y travailler occasionnellement.

A4.4.2 - PÉRIODE DES ESSAIS SOUTERRAINS

Le passage aux essais souterrains a conduit à la modification des procédures de radioprotection et a également eu des répercussions sur le déroulement des essais ainsi que sur l'organisation mise en œuvre pour assurer la protection du personnel. La modification majeure a concerné les personnels résidant sur l'atoll de Mururoa qui n'ont plus été amenés à évacuer les sites d'expérimentations. En revanche, toutes les précautions ont été prises pour parer aux risques hydrauliques immédiats ou différés dus à la sollicitation mécanique des atolls lors des explosions souterraines.

A4.4.2.1 - DISPOSITIONS PARTICULIÈRES

Une fois l'essai techniquement prêt (cf. Chapitre II), le personnel chargé des installations en cours de forage, (FGD ou post-forage), était rapatrié en secteur Est et le lagon était totalement évacué. Des barrages routiers contrôlaient les accès aux secteurs Sud et Nord de l'atoll à partir du secteur Est pour vérifier l'absence de personnels en dehors de ce secteur.

Un appel nominatif de toutes les personnes présentes sur le site était réalisé. Des points de regroupement étaient prévus pour l'ensemble du personnel, à l'exception des agents opérationnels au PC Goen et au PCT. Au milieu des années 80, le rassemblement se faisait sur les plates-formes surélevées destinées à assurer la sécurité des personnes face au risque hydraulique.

Une mission de reconnaissance (mission Surmar) des abords des sites était déclenchée quelques heures avant l'essai pour une ultime vérification de l'absence d'intrus dans les zones aériennes et maritimes de sécurité. Une mission de reconnaissance des effets mécaniques et radiologiques héliportées (mission Almée) et une mission de secours (mission Sar) prenaient l'air à H-40min et se positionnaient à distance de sécurité du point zéro.

A4.4.2.2 - PRÉVENTION DU RISQUE HYDRAULIQUE

Les terres émergées de la couronne des atolls de Mururoa et Fangataufa se situent à environ un mètre en moyenne au-dessus du niveau de la mer ; ces atolls sont donc très vulnérables aux phénomènes hydrauliques qu'ils soient naturels (tsunamis, cyclones, tempêtes tropicales) ou déclenchés par les essais nucléaires. En effet, l'onde de choc de l'explosion pouvait déclencher l'éboulement d'éléments de la falaise récifale générant une vague océanique sur le platier externe et une seiche dans le lagon. Ainsi, en juillet 1979, suite à l'essai Tydée un éboulement d'une fraction du flanc d'atoll du secteur Sud a généré, en retour, une vague qui a submergé le platier et la route, emportant et blessant gravement deux personnes.

Il a alors été décidé de compléter les moyens de sécurité pour les étendre à l'ensemble des risques hydrauliques. Pour prévenir ces évènements, un réseau de sismomètres et de géophones a été mis en place, permettant d'initier une alerte dans un délai court (environ 30 secondes). Afin d'assurer la sécurité des personnels en cas de vague de hauteur anormalement élevée, plusieurs moyens de protection ont été mis en place :

- En secteur Est, côté océan, une digue d'une hauteur de quatre mètres a été érigée pour protéger l'ensemble des zones d'habitation. Elle a été prolongée par un mur longeant les zones industrielles et aéroportuaires.
- Dans le même secteur, côté lagon, une digue de protection plus modeste a été construite au niveau des habitations, les protégeant des effets de seiche, dont l'amplitude peut atteindre un mètre.
- 22 plates-formes de plus de 100 m^2, pouvant accueillir 120 personnes et dont les structures pouvaient résister à une submersion de 1 mètre, avec une vitesse de 10 $km.h^{-1}$, assuraient une protection complémentaire en cas de submersion des digues.
- Dans les zones isolées de l'atoll où le risque était réel, 23 plates-formes pouvant accueillir 10 personnes ont été implantées tous les 700 m le long de la route, côté lagon, ainsi qu'aux abords de tous les chantiers. Ces installations étaient équipées d'une liaison VHF permettant de recevoir une alerte générée par un émetteur positionné au PCT, commandé par le réseau d'écoute sismique. Cette alerte déclenchait des signaux lumineux et sonores sur chaque plate-forme.
- Des équipements portatifs pouvaient aussi permettre de recevoir ce signal d'alerte, donnant au personnel un préavis de 90 secondes pour se réfugier sur les plates-formes avant l'arrivée de la vague océanique.

Les essais souterrains initialement réalisés sous la couronne de l'atoll ont été effectués dans les années 80 sous le lagon, vers le centre de l'atoll, afin d'atténuer de manière significative les sollicitations mécaniques des flancs de l'atoll. La réduction des puissances des essais effectués sous la couronne terrestre, a aussi considérablement abaissé les risques d'éboulement des pans de falaises récifales ou de glissement de dépôts alluvionnaires.



Une des plates-formes prévue pour accueillir le personnel lors de la réalisation d'un essai souterrain ou lors d'un événement hydraulique.

De fait, il n'a jamais été nécessaire d'utiliser les moyens de protection pendant toute la durée d'exploitation des sites d'expérimentations. Cependant, le dispositif de surveillance géo-mécanique a été conservé jusqu'à nous jours pour assurer la sécurité des militaires chargés du gardiennage (cf. Chapitre VII).

Glossaire

absorption : en radioécologie, phénomène qui correspond au passage des radionucléides au travers des membranes biologiques.

accrétion : augmentation d'une masse quelconque par addition ou accumulation.

actinides : radioéléments naturels et/ou artificiels dont le numéro atomique (nombre de protons du noyau) est supérieur à 89.

activation : réaction nucléaire tendant à rendre radioactifs certains éléments chimiques par bombardement par des neutrons ou d'autres particules.

activité : nombre de désintégrations par unité de temps au sein d'un radionucléide ou d'un mélange de radionucléides. Elle est exprimée en becquerel (Bq), unité qui correspond à une désintégration par seconde.

adsorption : en radioécologie, phénomène de surface qui conduit à un marquage externe d'un corps par les radionucléides.

advection : terme qui se réfère à tout mouvement, vertical ou horizontal, des masses d'eau ou d'air.

aérosols : particules en suspension dans l'atmosphère.

aliquote : partie représentative d'un échantillon.

anthropogammamétrie : mesure directe du rayonnement gamma émis par le corps humain.

anticyclone : centre des hautes pressions atmosphériques.

apparaux : terme générique désignant l'ensemble des objets formant l'équipement d'un navire pour le chargement, l'amarrage et le mouillage (treuils, palans, guindeaux, aussières, chaînes, ancres).

aragonite : carbonate de calcium métastable à température ordinaire et se transformant en général en calcite.

bathymétrie : mesure des profondeurs d'eau et traitement des données correspondantes.

becquerel : Unité de mesure de la radioactivité, symbole Bq. Un Bq équivaut à une désintégration par seconde. L'activité des échantillons de l'environnement est souvent exprimée en sous-multiple comme le millibecquerel (mBq), le microbecquerel (µBq) voire le nanobecquerel (nBq) alors que l'activité des sources radioactives s'exprime le plus souvent en multiples du becquerel : kilobecquerel (kBq), mégabecquerel (MBq), etc.

benthique : vivant sur le fond ou à proximité du fond des mers. Le benthos est l'ensemble des organismes vivant au fond ou à proximité du fond des mers.

biocénose : ensemble des organismes (animaux et végétaux) qui cohabitent au sein d'un même environnement physique (biotope), où ils sont soumis à des relations d'interdépendance.

biodétritique : élément, entier ou plus souvent sous forme de fragments, d'origine animale ou végétale, ayant été transformé ou non.

biosphère : ensemble des écosystèmes de la planète, comprenant tous les êtres vivants et les milieux où ils vivent.

biotope : milieu, de dimension et de composition très variables, qui sert de support à une biocénose.

calcite : carbonate de calcium plus ou moins riche en magnésium, elle est dite magnésienne si elle comprend 5 à 10 mole % de CO_3Mg.

chaîne trophique : ensemble des relations s'établissant entre des organismes, en fonction de la façon dont ceux-ci se nourrissent. En général, une chaîne trophique (réseau trophique) comprend des producteurs (végétaux), des consommateurs primaires (herbivores), des consommateurs secondaires (carnivores) et des décomposeurs (détritivores).

chlorose : disparition partielle de la chlorophylle dans un végétal entraînant le jaunissement des plantes.

conglomérat : roche sédimentaire détritique formée pour 50% au moins de débris de roches de dimension supérieure à 2 mm et liés par un ciment naturel.

contamination : dépôt de radionucléides sur des objets, des espaces découverts ou des personnes.

corallivore : animal se nourrissant de coraux comme certains poissons du genre *Chaetodon* et une étoile de mer urticante de grande taille l'*Acanthaster planci*.

coriolis, *force de* ***:*** force d'inertie à prendre en compte pour étudier le mouvement d'un corps (liquide ou gazeux) par rapport à un repère en rotation, par exemple par rapport à la Terre dans les applications à la géodynamique et la géophysique.

débit de dose : quotient de l'accroissement de dose (énergie absorbée par la matière par unité de masse) par la durée de l'intervalle de temps durant lequel il se produit. L'unité légale est le gray par seconde de symbole $Gy.s^{-1}$ (cf. Chapitre VI).

désintégration : transformation d'un noyau instable en un noyau stable ou instable au cours de laquelle le nombre et la nature des nucléons (neutron ou protons, particules constitutives du noyau atomique) sont modifiés (cf. Annexe 1).

détritivore : se dit d'un organisme s'alimentant en ingérant la matière organique morte laissée par les producteurs primaires (végétaux) ou par les consommateurs.

détritique : qui résulte de la désagrégation d'une roche préexistante.

dolomie : roche sédimentaire carbonatée.

dose absorbée: quotient de l'énergie moyenne communiquée à un élément de matière exposée à un rayonnement ionisant par la masse de cet élément. Elle s'exprime en gray (Gy). Un gray correspond à une énergie absorbée de 1 joule par kilogramme de matière (cf. Chapitre VI).

dose efficace : La dose efficace est la valeur de dose qui est destinée à estimer les risques dus à une exposition en termes généraux. Elle s'exprime en sievert (Sv). Elle fournit une base pour l'estimation de la probabilité d'apparition des effets stochastiques, comme les cancers et les effets génétiques. La dose efficace associée à l'inhalation d'un radionucléide est la somme des doses absorbées aux organes et tissus, chaque dose absorbée étant pondérée par un facteur reflétant la sensibilité de l'organe, ou du tissu, aux différents types de rayonnement (cf. Chapitre VI).

dose engagée : dose résultant de l'incorporation d'un ou de plusieurs radionucléides qui sera reçue au niveau d'un organe ou d'un tissu au cours de la vie d'une personne (50 ans pour les travailleurs). Elle s'exprime en sievert (Sv).(cf. Chapitre VI).

dose équivalente : Les doses efficaces et les doses absorbées à la thyroïde sont des doses équivalentes exprimées en sievert tenant compte de la nature des rayonnements auxquels l'individu a été exposé (alpha, bêta, gamma, neutron). Elle s'exprime en sievert (Sv). Ces doses sont aussi des doses engagées (cf. Chapitre VI).

dosimétrie : mesure de doses de rayonnements ionisants auxquelles un être vivant a été exposé. Elle peut être interne lorsque les radioéléments ont été incorporés par l'être humain ou externe si l'irradiation provient d'une source externe comme le sol, l'atmosphère, etc. (cf. Chapitre VI).

échinodermes : embranchement contenant des animaux exclusivement marins dont la symétrie est rayonnée (exemples les oursins, les étoiles de mer, les crinoïdes, les ophiures et les holothuries).

écosystème : c'est l'unité fonctionnelle de base en écologie qui inclut à la fois les êtres vivants et le milieu dans lequel ils vivent avec toutes leurs interactions réciproques entre le milieu et les organismes (écosystème = biotope + biocénose).

Ekman *(couche)* ***:*** couche de surface de la mer dans laquelle se fait sentir l'influence (la tension) du vent et où se fait le transport d'Ekman.

endobionte : animal ou végétal vivant à l'intérieur d'un substrat ou d'un être vivant.

endogé : qui vit dans le sol, les sédiments ou un substrat dur.

épibionte : animal ou végétal vivant fixé ou posé sur des supports ou sur d'autres êtres vivants

épithélium : tissu animal constitué d'une ou plusieurs couches de cellules séparant les différentes parties du corps des cavités.

espèce : unité indivisible de la Classification du monde vivant. Chaque espèce est désignée par un double nom latin ou latinisé. Le premier nom, avec majuscule initiale désigne le genre, et le second, en minuscule, désigne l'espèce proprement dite. Ce double nom latin est toujours en caractères italiques dans le texte.

euphotique : qualifie la couche superficielle des océans, dans laquelle l'intensité de la lumière solaire permet la photosynthèse.

facteur de concentration: dans le milieu aquatique, c'est le rapport entre l'activité d'un radionucléide dans l'organisme (ou organe, ou tissu) et l'activité de ce même radionucléide dans l'eau.

fission : scission d'un noyau lourd en deux morceaux, accompagnée d'émission de neutrons, de rayonnements et d'un important dégagement de chaleur (cf. Annexe 1).

flot *(courant de)* ***:*** mouvement horizontal de l'eau correspondant, avec un décalage plus ou moins important, à la marée montante. Les courants de flot portent généralement, selon le cas, vers la côte ou dans la direction de propagation de l'onde marée.

fractionnement : ce sont les modifications dans la composition du mélange radioactif, qui intervient entre l'instant de sa formation et celui du recueil d'un prélèvement de ce mélange, ce qui fait que l'échantillon mesuré n'est pas totalement représentatif des produits formés.

genre : subdivision d'une famille biologique, se répartissant elle-même en une ou plusieurs espèces (cf. définition d'espèce).

granulométrie : qui est relatif à la mesure des dimensions des grains d'un mélange, de la détermination de leur forme et de leur répartition statistique.

gray : unité de dose absorbée dans un élément de matière de masse 1 kilogramme auquel les rayonnements ionisants communiquent de façon uniforme une énergie de 1 joule. Symbole : Gy.

gymnosarde : poisson de la famille des scombridae (ex. maquereau) appelé thon à dents de chien.

halophile : se dit des plantes vivant sur les sols salés.

hépatopancréas : volumineuse glande digestive associée à l'estomac, en particulier chez les invertébrés comme les mollusques.

holothurie : animal marin de la classe des échinodermes de forme allongée vivant au contact du substrat, généralement les sédiments dont il se nourrit.

***HTO** (eau tritiée) :* Formule chimique associant 1 atome d'hydrogène, 1 atome de tritium et 1 atome d'oxygène. Naturellement, l'eau de mer contient 100 $Bq.m^{-3}$ d'HTO.

humus : ensemble de substances présentes dans le sol, résultant de la décomposition partielle des déchets de végétaux et en faible partie, d'animaux.

hydrologie : étude des eaux, de leur composition et de leurs propriétés. En océanographie, l'hydrologie s'attache à la mesure de la température et de la salinité des eaux de mer en vue de déterminer leur densité, qui est une grandeur fondamentale dans la dynamique marine.

ichtyologique : relatif aux poissons (faune des poissons).

indentation : échancrure d'une côte, d'un littoral.

ionisation : phénomène par lequel un ou plusieurs électrons sont émis (ou absorbés) par un atome ou une molécule, lesquels sont alors transformés en ions (cf. Annexe 1).

irradiation : exposition de l'organisme ou d'une partie de celui-ci, à des rayonnements ionisants (cf. Chapitre VI).

isotopes : formes différentes d'un même élément chimique de la table de Mendeleiev ayant des propriétés chimiques identiques mais des propriétés physiques différentes : période, rayonnements émis, etc. (cf. Annexe 1).

***jusant** (courant de) :* mouvement horizontal de l'eau correspondant, avec un décalage plus ou moins important, à la marée descendante. Les courants de jusant portent généralement, selon le cas, vers le large ou dans la direction opposée à celle de la propagation de l'onde marée. On dit aussi courant de reflux.

karst : région de calcaires et dolomites ayant une topographie souterraine particulière due à la dissolution de certaines parties du sous-sol. Dans les atolls, les cavités naturelles ainsi formées favorisent la circulation des eaux souterraines.

labile : se dit d'une contamination peu fixée sur un support.

lixiviation : en géologie, opération qui conduit par dissolution à libérer certaines substances contenues dans un solide, par exemple par les eaux d'infiltration et de ruissellement (synonyme : lessivage).

madréporaires : ordre des Cnidaires Anthozoaires (Hexacoralliaires) renfermant la majorité des coraux actuels. Ces animaux coloniaux dont le squelette est constitué de calcaire sont susceptibles de réaliser d'importantes constructions appelées à tort récifs de coraux.

matière fissile : nucléide dont le noyau peut subir la fission nucléaire par interaction avec des neutrons (par exemple ^{235}U et ^{239}Pu).

micron : Unité de mesure égale à un millième de millimètre (10^{-3} mm), ou un millionième de mètre (10^{-6} m). Symbole µ.

mille marin : unité de distance en mer égale à une minute de degré d'arc sur le méridien. Un mille marin ou nautique est égal à 1 852 mètres.

mordache : lors des essais souterrains, c'est une traverse posée en surface, à l'entrée du puits et qui permet la tenue du câble support du conteneur de l'engin à expérimenter.

nutriants : terme qui désigne l'ensemble des espèces chimiques nécessaires au développement de l'activité biologique (synonymes : nutriments et sels nutritifs).

oligotrophe : qualifie un milieu, une masse d'eau, où la concentration en éléments nutritifs (nutriments) est faible. Le développement du système trophique est alors limité par la disponibilité des éléments nutritifs.

organe critique : organe dont l'atteinte par les rayonnements ionisants est la plus pénalisante pour l'organisme humain.

pélagique : adjectif qui qualifie tout ce qui se passe en pleine eau sans relation avec le fond (contraire de benthique).

période : temps nécessaire pour que l'activité d'un radionucléide en un lieu donné soit réduite de moitié par suite de l'ensemble des processus pertinents, exemples : décroissance radioactive, dilution, érosion, élimination biologique, etc.).

phytoplancton : ensemble des organismes du plancton appartenant au règne végétal, de taille souvent microscopique, qui vivent en suspension dans l'eau. Les Diatomées et les Dinoflagellés constituent la plus grande partie des organismes du phytoplancton.

plancton : ensemble des organismes, animaux et végétaux, vivant en pleine eau et à faible capacité natatoire ne leur permettant pas de lutter efficacement contre les courants.

platier : pour l'écosystème corallien, il s'agit de l'élément principal de la partie interne ou externe d'un récif constitué essentiellement de coraux morts et de leurs débris (zone plate).

point zéro : point où se produit l'explosion nucléaire.

produit d'activation : élément radioactif résultant de la capture d'un neutron, par exemple l'uranium 238 devient par activation le plutonium 239.

produit de fission : produit radioactif provenant de la cassure du noyau d'un élément fissile (^{235}U ou ^{239}Pu par exemple).

radioactivité résiduelle : radioactivité mesurée après un temps déterminé ou après décontamination.

radiotoxicité : toxicité liée aux rayonnements émis par un élément radioactif présent dans l'organisme. Elle n'est pas seulement liée aux caractéristiques radioactives de l'élément considéré mais dépend également du métabolisme de cet élément dans l'organisme et, par suite de son état chimique et physique.

scintillateur : détecteur de radioactivité constitué d'un matériau susceptible d'émettre un rayonnement lumineux sous l'action d'un rayonnement ionisant. Par exemple, le cristal d'iodure de sodium (NaI) est utilisé pour la détection des rayonnements γ et le fluorure de zinc pour celle du rayonnement α.

sievert : unité de dose équivalente, dans le domaine de la radioprotection. Le sievert est égal au joule par kilogramme. Symbole Sv.

sol brun : terme de pédologie qualifiant un sol à horizons peu différenciés plus ou moins riche en humus.

sol ferrallitique : terme de pédologie qualifiant un sol rouge des régions tropicales humides pauvre en silice et caractérisé par la présence d'alumine libre et d'oxyde de fer.

sol vertique : terme de pédologie qualifiant un sol aux caractéristiques intermédiaires aux sols bruns eutrophes quand ils sont situés sur de fortes pentes, et aux sols ferrallitiques quand ils sont sur des pentes moins accusées. Les sols vertiques constituent l'originalité de la couverture pédologique des îles Gambier (Mangareva). On les trouve également aux îles Marquises (Nuku Hiva) ainsi qu'aux îles Australes (Rurutu).

spectrométrie γ : étude du rayonnement gamma à l'aide d'un spectromètre. Celui-ci est conçu de manière à détecter les rayonnements gamma et de les classer avec précision selon leur énergie. Cette fonction de classification (ou de tri) distingue le spectromètre des autres instruments qui mesure l'activité totale émise dans une gamme donnée d'énergie.

stochastique : aléatoire, qui paraît lié au hasard.

stratosphérique : qui se rapporte à la stratosphère, partie de l'atmosphère située entre 12 et 50 km au-dessus de la surface terrestre et où, dans un air très raréfié, la température se stabilise entre -50 et - 60 °C.

subsidence : lent mouvement d'affaissement des massifs volcaniques

symbiose : association durable, sinon constante, nécessaire et à bénéfices réciproques entre deux organismes vivants. Ces phénomènes sont assez répandus dans le milieu marin (exemples : les algues unicellulaires zooxanthelles avec les coraux ou les bénitiers).

tangon : espar horizontal placé en dehors du navire, perpendiculaire à la coque, servant notamment à y gréer des lignes de traîne.

taxinomique : caractérise la classification des espèces vivantes, tant végétales qu'animales

tégument : tissu le plus superficiel isolant l'intérieur des organismes de l'environnement extérieur.

tellurique : qualifie ce qui provient de la Terre.

thermocline : zone de transition entre deux masses d'eau de températures différentes et se mélangeant difficilement.

thermoluminescence : émission d'un rayonnement par chauffage d'un corps préalablement irradié et qui libère, par suite de son élévation de température, l'énergie emmagasinée pendant l'irradiation. Des instruments de mesure, sur la base de ce principe, sont utilisés pour la dosimétrie opérationnelle des personnes comme les stylos dosimètres thermoluminescents.

tropopause : surface de séparation de la troposphère et de la stratosphère. Elle correspond à un minimum de température.

troposphérique : qui se rapporte à la troposphère, partie de l'atmosphère située entre la surface terrestre et une altitude de 8 km depuis les pôles à 15 km au niveau de l'Équateur. Sa partie basse est le siège des perturbations météorologiques.

zooplancton : ensemble des organismes du plancton appartenant au règne animal. Les crustacés et plus particulièrement les copépodes y sont très représentés.

Sigles et acronymes

ACMS : Association des centres médico-sociaux.

AEN : Agence pour l'énergie nucléaire, organisme de coopération créé par l'OCDE, en 1957.

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique, créée en 1957 (abréviation anglo-saxonne : *IAEA*).

AMR : Atelier de montage et de réglage du conteneur de l'engin nucléaire.

Andra : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

APA 1 : Appareil de prélèvement d'aérosols, d'un débit de 1 $m^3.h^{-1}$ (essais atmosphériques).

APA 100 : Appareil de prélèvement d'aérosols, d'un débit de 100 $m^3.h^{-1}$ (essais atmosphériques).

BB : Bâtiment base (*BB Maine*, *BB Moselle*, *BB Maurienne* etc.).

BCB : Bâtiment de contrôle biologique (*BCB Marara*).

BEM : Barge enregistrement mesures.

BFM : Barge de forage et de manutention.

BPV : Blockhaus prise de vues, situé à Fangataufa, en zone Empereur.

BRO : Bâtiment de recherche océanographique (*BRO La Coquille*).

BSL : Bâtiment de soutien logistique (*BSL La Rance*, *BSL Rhin*, *BSL Garonne*, *BSL Tarn* etc.).

C2S ou **CSS :** Commission de sécurité des sites d'expérimentations nucléaires (Défense/CEA).

CASA 110: Collecteur d'aérosols de surveillance atmosphérique, de 110 $m^3.h^{-1}$ (essais souterrains).

CATV : Cheminée atteignant le toit du volcanisme.

CCS : Commission consultative de sécurité.

CDAP : Centre de décontamination des aéronefs et des personnels (essais atmosphériques).

CEA : Commissariat à l'énergie atomique.

CEMA : Chef d'état-major des Armées.

CEP : Centre d'expérimentation du Pacifique.

CID : Centre d'intervention de décontamination (essais atmosphériques).

Cimagré : Barge de cimentation et de transport d'agrégats, utilisée pour l'obturation des puits de forage.

CIPR : Commission internationale de protection radiologique (appellation anglo-saxone : *ICRP*).

CIRC : Centre international de recherche contre le cancer.

$CMA_{eau\ ou\ air}$: Concentration maximale admissible (dans l'eau de boisson ou dans l'air).

CMR : Cabine de mesures radiologiques.

CMS : Commission mixte de sécurité.

CNRS : Centre national de la recherche scientifique.

Cofrac : Comité français d'accréditation (pour les mesures de laboratoire).

Comsup : Commandement supérieur des forces armées dans le Pacifique.

Crapal : Collecteur des retombées des aérosols et des précipitations atmosphériques liquides.

CSEN : Commission de sûreté des engins Nucléaires.

DAM : Direction des applications militaires du CEA.

Dase : Département, analyse, surveillance, environnement (CEA/DAM).

DATR : Personnel directement affecté à des travaux sous rayonnements (PDA, DA ou catégorie A).

DE : Direction des essais du CEA/DAM.

DGA : Délégation générale pour l'armement.

Diram/Pac : Direction des applications militaires dans le Pacifique (CEA).

Dircen : Direction des centres d'expérimentations nucléaires (rattaché au ministre de la Défense).

Dirtec : Direction technique du CEA/DAM/Essais (Dirtec/Essais, Dirtec/Sites).

DMA : Dose maximale admissible (dosimétrie des personnes).

DSCEN : Département de suivi des centres d'expérimentations nucléaires (créé en 1998 à la DGA).

FDO : Forage dirigé oblique.

FGD : Forage grand diamètre.

FIR : Forage incliné rectiligne.

FIRC : Forage incliné radiochimie.

FVRC : Forage vertical radiochimie.

Goen : Groupement opérationnel des expérimentations nucléaires.

GSR : Groupe de surveillance radiologique, devenu LSR, puis Lése.

Hélinuc : Mission héliportée de mesure de rayonnement nucléaire.

Hydropol : Hygrologie en Polynésie (campagne de mesures océaniques).

Inserm : Institut national de la santé et de la recherche médicale.

IPSN : Institut de protection et de sûreté nucléaire (actuellement IRSN).

IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (regroupement de l'IPSN et de l'OPRI).

eV : Symbole de l'électronvolt (1 eV = $1{,}6.10^{-19}$ joule) et ses multiples : keV, MeV et GeV.

LAI : Limite annuelle d'incorporation (ou LIA, Limite d'incorporation annuelle).

LAM : Laboratoire d'analyses médicales du CEA.

LD : Limite de détection.

LDG : Laboratoire de détection géophysique (CEA).

Lése : Laboratoire d'étude et de surveillance de l'environnement (CEA/IPSN, Tahiti Mahina).

LRB : Laboratoire de radiobiologie (Service de santé des Armées).

LSR : Laboratoire de surveillance radiologique (devenu Lése).

Manucea : Barge de manutention du CEA, pour les essais sous lagon à Mururoa.

Manutere : En polynésien *manu* (oiseau) et *tere* (qui part au loin) : barge de manutention permettant son transfert océanique pour les essais sous lagon à Fangataufa.

MES : Matières en suspension.

NE : Personnel non exposé (à des Travaux sous Rayonnements ionisants).

OCDE : Organisation de coopération et de développement économique (créée en 1960).

OMS : Organisation mondiale de la santé (ou *WHO, World Health Organization*).

OPRI : Office de protection contre les rayonnements ionisants (ex. SCPRI)

PC Goen: Poste de commandement du groupement opérationnel des essais nucléaires.

PCB : Poste de contrôle biologique.

PCR : Poste de contrôle radiologique (essais atmosphériques).

PCT : Poste de commande de tir, situé en zone Anémone.

PDA : Personnel directement affecté (aux travaux sous rayonnements ionisants ou DA, DATR, catégorie A).

PDF : Poste de décontamination fine, des services de Santé.

PEA : Poste d'enregistrement avancé (essais atmosphériques).

PEE : Poste d'enregistrement éloigné, sur les zones Empereur et Faucon (essais atmosphériques).

PK : Point kilométrique.

PNDA : Personnel non directement affecté (aux travaux sous rayonnements ionisants, ou NDA, ou catégorie B).

PPB : Poste de prélèvements biologiques.

PRL : Personnel de recrutement local.

PSR : Poste de surveillance radiologique (essais atmosphériques).

QMA : Quantité maximale admissible.

RAD : Mission de reconnaissance radiologique du jour J de la réalisation d'un essai.

SCPRI : Service central de protection contre les rayonnements ionisants.

SMCB : Service mixte de contrôle biologique (Défense-CEA,), créé en 1964.

SMSR : Service mixte de sécurité radiologique (Défense-CEA), créé en 1964.

SMSRB : Service mixte de sécurité radiologique et biologique de l'Homme et de l'environnement (Défense/CEA), créé en 1994 par la fusion du SMSR et du SMCB.

SMT : Service médical du travail (CEA).

SPE : Service de protection des entreprises.

SPR : Service de protection radiologique des centres du CEA.

SPS : Service de protection sur les sites (CEA), intégré au SMSR en 1964.

SRCE : Service de radioanalyse, chimie et environnement du CEA/DAM/DASE (essais souterrains).

SRCI : Section de radioprotection des chantiers et des installations du SMSR (essais souterrains).

SSA : Service de santé des armées.

Stadec : Station de décontamination du SMSR à Mururoa (à Denise puis en zone industrielle Odette).

TDS : Installation de traitement des solides (échantillons de laves)

Telsite : Système de Télésurveillance du site, de surveillance mécanique automatisé.

THA : Très haute activité.

TILA : Plateforme de forages pour tirs sous lagon.

TLM : Télémesures sites et atolls proches pour les mesures de radioactivité.

TNP : Traité de non prolifération nucléaire.

TNT : Trinitrotoluène (solide cristallisé constituant d'un explosif).

TU : Temps universel (méridien de Greenwich).

***Unscear* :** *United nations scientific committee on the effects of atomic radiation.*

ZC : Zone contrôlée (au plan radioactif).

ZCIT : Zone de convergence intertropicale.

ZCPS : Zone de convergence du Pacifique Sud.

ZEE : Zone Économique Exclusive.

ZI : Zone interdite.

ZS : Zone surveillée (au plan radioactif).

louisjean IMPRIMEUR

59, Av. Émile Didier
05003 Gap Cedex
Tél. 04 92 53 17 00

Dépôt légal : 823
Décembre 2006
Imprimé en France