

N° 3571

N° 207

ASSEMBLÉE NATIONALE

SÉNAT

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

ONZIÈME LÉGISLATURE

SESSION ORDINAIRE DE 2001-2002

Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale
le 5 février 2001

Annexe au procès-verbal de la séance
du 6 février 2001

**OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES**

RAPPORT

SUR

**LES INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES ET SANITAIRES
DES ESSAIS NUCLEAIRES EFFECTUES PAR LA FRANCE
ENTRE 1960 ET 1996
ET ELEMENTS DE COMPARAISON AVEC LES ESSAIS
DES AUTRES PUISSANCES NUCLEAIRES**

Par M. Christian BATAILLE, Député
Et M. Henri REVOL, Sénateur

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale
par M. Jean-Yves LE DÉAUT,
Président de l'Office

Déposé sur le Bureau du Sénat
par M. Henri REVOL,
Premier Vice-Président de l'Office.

SAISINE



COMMISSION DE
LA DÉFENSE NATIONALE
ET DES FORCES ARMÉES

LE PRÉSIDENT

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LIBERTÉ-ÉGALITÉ-FRATERNITÉ

PARIS, le 19 janvier 2001

Monsieur le Président,

J'ai l'honneur de vous informer que, sur la recommandation de M. Bernard Grasset, rapporteur de la proposition de résolution n° 2607 de Mme Marie-Hélène Aubert et plusieurs de ses collègues tendant à la création d'une commission d'enquête sur les conséquences économiques, sociales, environnementales et sanitaires des essais nucléaires français, la Commission de la Défense de l'Assemblée nationale a décidé, lors de sa séance du 17 janvier 2001, de saisir l'Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques d'une demande d'étude sur les incidences environnementales et sanitaires des essais nucléaires effectués par la France entre 1960 et 1996, conformément à l'article 6 ter paragraphe V de l'ordonnance n° 58-1100 du 17 novembre 1958.

La Commission souhaite que, dans la mesure du possible, cette étude contienne des éléments de comparaison avec les conséquences des expérimentations des autres puissances nucléaires (Inde et Pakistan inclus).

La Commission a considéré que la saisine de l'Office que vous présidez était de nature à répondre aux préoccupations des signataires de la proposition de résolution n° 2607, en raison notamment des moyens d'investigation scientifique dont il dispose.

L'étude demandée par la Commission de la Défense compléterait le rapport n° 541, relatif à l'évolution de la recherche sur la gestion des déchets nucléaires militaires de haute activité établi le 15 décembre 1997 par M. Christian Bataille au nom de l'Office. M. Jean-Yves Le Déaut, Vice-Président de l'Office, a bien voulu m'indiquer, dans un courrier en date du 17 octobre 2000, que l'Office serait en mesure d'approfondir ses précédents travaux sur les déchets nucléaires militaires en utilisant, si nécessaire, les pouvoirs qu'il tient de l'article 6 ter de l'ordonnance n° 58-1100 du 17 novembre 1958.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Président, l'assurance de mes sentiments les meilleurs.

Paul QUILÈS

M. Henri REVOL
Sénateur de la Côte d'Or
Président de l'Office parlementaire
d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
ASSEMBLÉE NATIONALE

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	7
PROBLEMATIQUE DES ESSAIS NUCLEAIRES ET DE LEURS INCIDENCES	9
<i>I - Le choix des sites.....</i>	<i>9</i>
<i>II - Présentation d'ensemble des essais et des retombées.....</i>	<i>12</i>
1. L'ensemble des essais	13
2. L'exposition aux radiations et les retombées	15
LES ESSAIS NUCLEAIRES FRANÇAIS	19
<i>I - Les éventuelles incidences au Sahara.....</i>	<i>19</i>
1. Les principes généraux de sécurité	20
2. La sécurité radiologique.....	21
3. Les essais atmosphériques : caractéristiques et incidences	25
3.1. L'ensemble des faits	25
3.2. Les incidences sanitaires sur le personnel et les populations locales	28
3.3. Les résultats des mesures dans l'environnement	28
4. Les essais nucléaires souterrains.....	34
5. Bilan radiologique des essais souterrains.....	35
5.1. L'accident Béryl (1 ^{er} mai 1962).....	35
5.2. L'essai Améthyste.....	40
5.3. Les essais Rubis et Jade.....	40
6. Les expériences complémentaires	41
7. Bilan global	42
<i>II - Les essais nucléaires en Polynésie : la recherche d'une incidence minimale.....</i>	<i>45</i>
1. La situation géographique et climatique	45
2. Les conditions de réalisation des essais atmosphériques ; les différents types de tirs.....	48
2.1. Des tirs atmosphériques.....	48
2.2. Des tirs regroupés en « campagnes »	48
2.3. En premier lieu, les tirs sur barge	49
2.4. En second lieu, les tirs sous ballon	49
2.5. Par ailleurs, des essais spécifiques : tirs par avion et essais de sécurité.....	50
3. La sécurité des essais atmosphériques	51
3.1. La « sécurité météorologique »	52
3.2. La vigilance environnementale et sanitaire	54
<i>III - L'expertise des incidences environnementales en Polynésie : les essais atmosphériques</i>	<i>55</i>
1. Le point le plus ausculté de la planète	55
2. La liste et les caractéristiques des essais dans l'atmosphère de 1966 et 1974.....	56
3. Les incidences relevées par les autorités françaises et l'UNSCEAR.....	58
3.1. Le principe et l'analyse des retombées	58
3.2. Les retombées sur les secteurs habités.....	63
3.3. Les incidences relevées par l'UNSCEAR et l'AIEA	72
4. Les incidences relevées par des instances extérieures	74
4.1. Du début à 1982.....	74
4.2. La « mission Atkinson »	75
<i>IV - L'expertise des incidences environnementales en Polynésie : les essais souterrains....</i>	<i>77</i>
1. L'étude de la Commission géomécanique internationale	79
1.1. La Commission géomécanique internationale.....	79
1.2. Résumé des résultats, conclusions et recommandations du rapport :	80
1.3. Stabilité des pentes et affaissements de surface	82
1.4. La surveillance proposée pour la pente Nord-Est de Mururoa et pour Fangataufa	86
2. Le rapport du Comité consultatif international de l'AIEA	91
2.1. Mandat de l'étude et principes d'organisation.....	91

2.2. L'évaluation des conditions radiologiques actuelles	94
2.3. L'évaluation des conditions radiologiques futures.....	95
2.4. Doses estimées dues aux matières radioactives résiduelles	98
<i>Conclusions et recommandations du Comité consultatif international de l'AIEA</i>	103
Conclusions.....	103
Recommandation	104
<i>V – L'expertise à la recherche de conséquences sanitaires</i>	105
1. Les personnels participant aux activités du CEP	106
1.1. Le suivi médical courant.....	106
1.2. Le suivi dosimétrique	106
2. Suivi sanitaire des populations.....	108
2.1. Le registre des cancers de Polynésie française	108
2.2. Les études épidémiologiques	109

LES ESSAIS NUCLEAIRES AMERICAINS117

<i>I - Les îles Marshall (Bikini et Enewetak)</i>	119
1. Les faits.....	120
1.1. Enewetak.....	120
1.2. Bikini	121
1.3. Le retour dans les atolls contaminés lors du tir Bravo.....	123
2. Bikini : le constat	124
3. Bilan global des îles Marshall et recommandations de l'AIEA	125
<i>Conclusions et recommandations du rapport de l'AIEA</i>	127
4. Observation d'ensemble.....	130
<i>II – Le site d'essais du Nevada (N.T.S.)</i>	131
1. Les faits.....	131
2. Les constats.....	133
2.1. Approche sommaire des schémas de retombées radioactives locales et régionales	133
2.2. L'étude du NCI (Institut National du Cancer) et ses suites.....	137
2.3. Les estimations des risques de cancer.	144
2.4. « Les informations pour la pratique clinique et la santé publique »	145
2.5. La situation des participants aux essais	147
3. Les essais souterrains.....	150

LES ESSAIS NUCLEAIRES SOVIETIQUES153

<i>I - L'ensemble des essais soviétiques</i>	155
<i>II - Le site de Semipalatinsk</i>	158
1. Le site lui-même.....	158
2. Les caractéristiques des essais atmosphériques	158
3. Les caractéristiques des essais souterrains.....	159
3.1. Les essais souterrains proprement dits.....	162
3.2. Les tirs d'excavation (ou de cratère)	164
4. Les éléments de mesure des retombées.....	166
4.1. L'exposition externe	166
4.2. L'exposition interne.....	169
5. Les conséquences sanitaires	172
5.1. Approche générale	172
5.2. Les recherches récentes	173
6. La situation radiologique actuelle du site d'essais	175
6.1. Les études réalisées en 1990-1994	175
6.2. Une appréciation d'ensemble	178
6.3. Le rapport de l'AIEA	179
<i>III - Les tirs d'activités pacifiques</i>	182
<i>IV - Le site d'essais de Nouvelle-Zemble</i>	187
1. Présentation générale	187
1.1. Les essais atmosphériques	188
1.2. Les essais souterrains.....	189
2. Les incidences des essais	189
2.1. La mesure de la radioactivité.....	189
2.2. Les conséquences observées	190

<i>V - Les autres sites d'essais</i>	191
1. Kapustin Yar	191
2. Totsk.....	191
LES ESSAIS NUCLEAIRES BRITANNIQUES	193
<i>I - De nombreux sites pour les essais les plus limités : les essais atmosphériques</i>	193
1. Les débuts : Monte Bello puis Emu et Maralinga	194
2. Le stade du thermonucléaire : les îles Malden et Christmas.....	195
3. Appréciations d'ensemble	196
<i>II - Les incidences générales : les retombées</i>	196
<i>III - La décontamination du site de Maralinga</i>	199
<i>IV - La recherche d'incidences sanitaires</i>	200
1. Les éléments factuels	200
2. Les études épidémiologiques	202
2.1 L'étude au NRPB.....	202
2.2 L'étude sur les marins néo-zélandais	204
2.3. l'éventuel recours à des « techniques radiobiologiques »	205
LES ESSAIS NUCLEAIRES CHINOIS	207
<i>I - Conditions de réalisation des essais</i>	207
1. Les essais atmosphériques	208
2. Les essais souterrains.....	208
<i>II - Les incidences éventuelles</i>	209
LES ESSAIS NUCLEAIRES EN INDE ET AU PAKISTAN	213
<i>I - L'Inde</i>	213
<i>II - Le Pakistan</i>	213
CONCLUSION DU RAPPORT	215
RECOMMANDATIONS DES RAPPORTEURS	217
EXAMEN DU RAPPORT PAR L'OFFICE	219
ANNEXES	221
ANNEXE 1 : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNEES	223
ANNEXE 2 : COMPOSITION DES INSTANCES INTERNATIONALES CHARGEES DES EXPERTISES.....	229
ANNEXE 3 : GLOSSAIRE	239
ANNEXE 4 : REPRESENTATIONS FIGUREES POUR DIFFERENTS SITES D'ESSAIS	245

INTRODUCTION

L'Office a été chargé par la Commission de la Défense nationale et des forces armées de l'Assemblée nationale de la présente étude sur les incidences environnementales et sanitaires des essais nucléaires effectués par la France. Avec des éléments de comparaison sur les conséquences des expérimentations des autres puissances nucléaires, le sujet est à la fois considérable par le champ des questions qu'il aborde mais pas du tout inédit puisqu'au milieu des années cinquante bien des problèmes avaient été ouvertement posés et analysés : le moratoire de 1958 à 1961 sur les expérimentations atmosphériques en atteste.

Le Parlement français s'est tout naturellement intéressé aux problèmes que les conséquences des essais peuvent soulever.

Il y a cinq ans, l'un de nous deux¹, rapporteur de l'étude sur « *l'évolution de la recherche sur la gestion des déchets nucléaires à haute activité* », a été amené à aborder, à travers le tome II (déchets militaires) les essais nucléaires français et les conditions dans lesquelles ils avaient eu lieu ainsi que leurs conséquences, l'accent étant naturellement mis sur les essais souterrains dans ce contexte.

Les remarques qui avaient été faites alors sur le plan géologique notamment et sur le plan sanitaire appelaient des vérifications et éventuellement des confirmations qui sont intervenues depuis et qui permettent de compléter utilement les constats et les analyses précédentes : il s'agit naturellement du rapport de l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique) et de la Commission internationale géomécanique. En même temps elles mettent fin, et le présent rapport en prend acte, à des questionnements qui, poursuivis à l'infini au-delà de ces réponses particulièrement argumentées, seraient redondants.

Au-delà du cas des incidences des essais français, la saisine de la Commission de la Défense nationale de l'Assemblée nationale, nous a amenés à traiter celles des autres puissances nucléaires, sujet moins abondamment abordé.

En fait, au cours des dix dernières années, beaucoup de choses, pour ne pas dire tout, a changé dans ce domaine. L'éclatement de l'URSS a permis de connaître progressivement de nombreux éléments d'information et des réalités diverses. Les Américains de leur côté ont déclassé de très nombreux pans de leurs documents militaires et technologiques, pas toujours sans risque peut-être quant à la prolifération, et plusieurs études sanitaires ou épidémiologiques ont élargi les possibilités d'appréhender les problèmes. Les Français eux-mêmes, à travers les travaux menés en particulier à l'appui des expertises précitées, ont ouvert l'accès

¹ Christian Bataille

à certaines données qui, on le verra, permettent de saisir véritablement toutes les facettes des situations.

Ainsi, à l'aide d'éléments nouveaux très substantiels, il a été possible de réaliser une appréciation actualisée des incidences dans une mise en perspective très large et d'autant plus enrichissante.

Une brève présentation de la problématique des essais et de leurs incidences constituera la première partie de ce rapport. Elle permettra ensuite d'en traiter le thème principal : les essais français, puis ceux des différentes puissances nucléaires. Non seulement la spécificité de la situation de chaque pays militaire, politique, géographique, diplomatique, économique pour ne pas dire culturelle au sens large du terme, exige une présentation séparée pour chacun d'entre eux, mais encore l'approche par site d'essais s'impose également, tant elle reflète des évolutions propres qui ne seraient pas explicables sans le contexte « géo-politico-technologique » spécifique aux conditions de création et de fonctionnement de chaque site d'essais, la Chine étant l'exception puisque tous ses essais ont eu lieu au Lob Nor.

PROBLEMATIQUE DES ESSAIS NUCLEAIRES ET DE LEURS INCIDENCES

L'utilisation de l'arme atomique au Japon en août 1945 n'a été précédée que d'un essai (à Alamogordo le 16 juillet 1945) et surtout n'a été suivie jusqu'en janvier 1951 que par 5 essais (2 à Bikini en 1946 et 3 à Enewetak en 1948) c'est dire que même pour les Etats-Unis à l'issue de la seconde guerre mondiale la nécessité d'installation d'un site d'essais nucléaires ne s'est dégagée que progressivement. Les îles Marshall avaient certes été choisies et les deux atolls précités évacués à cette fin mais cela semblait conçu d'une manière limitée, compte tenu, entre autres, du caractère exclusivement atmosphérique, alors, de ces essais. On ne concevait pas, à ce moment, de réaliser des essais souterrains et d'ailleurs, pour tous les pays, le choix des sites s'est fait, à ce moment ou plus tard, dans cette perspective.

La première bombe atomique soviétique, le 29 août 1949, a complètement modifié la situation en enlevant aux Etats-Unis leur monopole et en contribuant à les amener à systématiser leurs essais et à les pratiquer sur une échelle beaucoup plus grande. Peu après, les Britanniques ont fait leur entrée en scène et ont été confrontés dès le début à la question du site d'essais, après le refus des Américains de les accueillir et les essais soviétiques se sont multipliés à partir de la première bombe thermonucléaire (12 août 1953) sur le site de Semipalatinsk puis ailleurs.

I - Le choix des sites

La situation de chacune des puissances nucléaires est évidemment fort différente et les conditions dans lesquelles chaque site a été choisi puis développé le sont aussi. Les impératifs militaires sont peut être comparables pour les Etats-Unis et l'URSS ; les contraintes politiques et diplomatiques ne le sont guère. Par ailleurs, les deux superpuissances disposaient toutes deux de territoires immenses et variés qui leur laissaient une très large palette de choix ce qui, paradoxalement on le verra, ne les a pas nécessairement poussées à faire le bon choix qu'il s'agisse du Nevada ou Semipalatinsk.

Les Britanniques, exerçant alors leur souveraineté sur de nombreux territoires variés et propices pour certains à des essais nucléaires, se sont beaucoup déplacés et ont pratiqué ce qu'on pourrait appeler «une grande mobilité

nucléaire » pour un nombre d'essais particulièrement restreint. Le pragmatisme britannique y est peut-être pour quelque chose.

Le cas de la France sera largement développé mais il est plus simple : amenée à quitter le site saharien et s'appuyant sur l'expérience des trois autres, elle a tout naturellement choisi un site insulaire isolé qui est apparu particulièrement adapté.

La Chine, quant à elle, venant encore plus tard, a pu elle aussi bénéficier des expériences acquises, notamment celles qu'elle a subies comme voisine du site soviétique de Semipalatinsk, seul cas de retombées régionales transfrontalières et, malgré le caractère très limité encore des informations disponibles à son sujet, semble avoir évité des difficultés que d'autres ont pu rencontrer.

➤ On perçoit ainsi combien le facteur temps a été essentiel pour l'appréciation des termes des problèmes.

Malgré l'extraordinaire secret qui caractérise très normalement des essais militaires en général et ceux de ce type en particulier, chaque pays semble avoir tiré profit tout d'abord bien sûr de ses propres expériences, même si cela a pu être long (Nevada, Semipalatinsk) ou insuffisant, mais aussi, semble-t-il, de ce qu'il a pu éventuellement apprendre des autres, dès lors que les techniques de renseignements militaires le permettaient (observation, en particulier satellitaire, et mesures aériennes et sismiques).

Malgré l'importance et le caractère pérenne du site au Nevada, il est devenu rapidement clair que les tirs dépassant un seuil de puissance assez bas devraient avoir lieu ailleurs : aux Marshall qui ont servi parallèlement de site d'essais où ils avaient déjà commencé mais aussi dans le « Pacifique central » à Christmas et Johnston et encore ailleurs.

En URSS, où la prise en compte d'une « opinion publique » n'était pas une donnée du problème², la nécessité d'éviter des tirs de très forte puissance à Semipalatinsk a contribué à la création relativement accélérée du site de la Nouvelle-Zemble.

Certaines contraintes étaient évidentes. Outre l'exigence d'un endroit où le plus strict secret pouvait être respecté, l'impératif météorologique s'imposait lui aussi et les connaissances au moment du choix n'ont pas toujours été

² Le rapport de l'accident de Kyshtym survenu dans l'Oural en 1957 et qui fut diffusé en 1974 en URSS et en 1989 à l'extérieur commentait en quelques lignes les risques : « *L'expérience acquise par les pays possédant un domaine nucléaire développé dans la production et l'utilisation de l'énergie atomique montre que certaines catégories professionnelles et populations peuvent être soumises au danger d'une exposition trop forte* » cité par D. Robeau, Catastrophes et accidents nucléaires dans l'ex Union Soviétique, IPSN, EDP, 2001.

suffisantes ou bien exploitées pour permettre une limitation des retombées (Nevada et Semipalatinsk).

D'autres facteurs, que l'on évoquera plus précisément en traitant chaque site, ne devaient pas être perdus de vue pour expliquer certains choix.

Ainsi, les dimensions matérielle et financière ont constitué des contraintes sérieuses surtout si l'on se rappelle que pendant la période des essais atmosphériques, les effectifs en cause pouvaient être considérables et que la contrainte géographique, l'éloignement, ne devaient pas accentuer encore les charges, ce qui explique sans doute que le Nevada et Semipalatinsk soient restés en service très longtemps.

➤ L'évolution s'est aussi traduite d'une manière spectaculaire, dans la plupart des cas, par une recherche de la limitation des retombées à travers des techniques de tirs nettement moins polluantes depuis le tir au sol ou encore sous-marin, au tir sous ballon ou par avion à une altitude évitant tout contact entre la boule de feu et le niveau du sol.

➤ Il ne fait pas de doute enfin que la circulation de l'information sur l'importance des retombées radioactives à la fin des années cinquante, malgré le climat de la guerre froide, a fortement pesé pour la limitation ou l'arrêt des tirs atmosphériques lesquels avaient atteint, surtout depuis la suspension du moratoire américo-soviéto-britannique en 1961-1962, des niveaux plus que considérables ainsi que le montre le tableau ci-après regroupant tous les tirs atmosphériques de plus de 4 mégatonnes (puissance de tir) :

Puissances estimées de fission et de fusion pour des essais égaux ou supérieurs à 4 Mégatonnes

Date	Designation	Type d'essai	Site	Puissance (en mégatonnes)		
				Fission	Fusion	Total
Chine						
17 November 1976		Air	Lop Nor	2.2 ^a	1.8	4
Etats-Unis						
28 February 1954	Bravo	Surface	Bikini	9.0 ^a	6.0	15
4 May 1954	Yankee	Barge	Bikini	9.0 ^a	4.5	13.5
26 March 1954	Romeo	Barge	Bikini	7.3 ^a	3.7	11
31 October 1952	Mike	Surface	Enewetak	5.7 ^a	5.7	10.4
12 July 1958	Poplar	Barge	Bikini	3.2 ^a	6.1	9.3
28 June 1958	Oak	Barge	Enewetak	3.0 ^a	5.9	8.9
30 October 1962	Housatonic	Tir aérien	Johnston Island	4.15	4.15	8.3
27 June 1962	Bighorn	Tir aérien	Christmas Island	3.83	3.82	7.65
25 April 1954	Union	Barge	Bikini	4.6 ^a	2.3	6.9
20 July 1956	Tewa	Barge	Bikini	2.3 ^a	2.7	5
10 July 1956	Navaho	Barge	Bikini	1.5 ^a	3.0	4.5
URSS						
30 October 1961	Test 130	Air	Novaya Zemlya	1.5 ^c	48.5	50
24 December 1962	Test 219	Air	Novaya Zemlya	8.07	16.13	24.2
5 August 1962	Test 147	Air	Novaya Zemlya	7.03	14.07	21.1
25 September 1962	Test 173	Air	Novaya Zemlya	6.37	12.73	19.1
27 September 1962	Test 174	Air	Novaya Zemlya	8.07	16.13	24.2 ^d
23 October 1961	Test 123	Air	Novaya Zemlya	4.17	8.33	12.5
22 October 1962	Test 183	Air	Novaya Zemlya	4.1	4.1	8.2
31 October 1961	Test 131	Air	Novaya Zemlya	2.5	2.5	5
27 August 1962	Test 160	Air	Novaya Zemlya	2.1	2.1	4.2
4 October 1961	Test 113	Air	Novaya Zemlya	2	2	4 ^e
6 October 1961	Test 114	Air	Novaya Zemlya	2	2	4
25 August 1962	Test 158	Air	Novaya Zemlya	2	2	4 ^e
19 September 1962	Test 168	Air	Novaya Zemlya	2	2	4 ^e
Total						
		25 Essais		106	183	289

^a Estimated from measured stratospheric inventories [L7, L8] and global deposition [F7].

^b Fission yield arbitrarily adjusted to obtain agreement with reported total fission yields for test series: 1952-1954 = 37 Mt (36 Mt from >1 Mt events), 1956 = 9 Mt (8 Mt from >1 Mt events), 1957-1958 = 19 Mt (14 Mt from >1 Mt events) [D7].

^c Officially reported value [M2].

^d Reported yield: >10 Mt.

^e Reported yield: 1.5-10 Mt.

Le total de ces 25 tirs atmosphériques de 4 mégatonnes et plus représente avec 289 mégatonnes beaucoup plus de la moitié de la puissance de tous les tirs atmosphériques (440 Mégatonnes pour 543 tirs recensés par l'UNSCEAR).

II - Présentation d'ensemble des essais et des retombées

L'évaluation et l'analyse de l'ensemble des retombées radioactives des essais nucléaires ayant été largement traitées depuis longtemps et réactualisées récemment par l'UNSCEAR en premier lieu, les problèmes des retombées locales

et régionales étant traitées à partir des différents sites, on se contentera ici de rappeler quelques éléments généraux nécessaires à la compréhension des questions et ce à partir, précisément des données fournies par ce comité spécialisé des Nations-Unies³.

1. L'ensemble des essais

Le nombre total d'essais nucléaires est donné par pays, catégorie d'essais et puissance par le tableau ci-après :

Tableau résumé des essais nucléaires

Pays	Nombre d'essais			Puissance (en Mégatonnes)		
	Atmosphériques	Souterrains	Total	Atmosphériques	Souterrains	Total
Chine	22	22	44	20,7	1	22
France	50 ^a	160	210	10,2	3	13
Inde	--	6	6	--	--	--
Pakistan	--	6	6	--	--	--
Royaume-Uni	33 ^b	24	57	8,1	2	10
Etats-Unis	219 ^c	908	1127	154	46	200
URSS	219	750	969	247	38	285
Tous pays	543	1876	2419	440	90	530

^a : inclus 5 essais de sécurité

^b : inclus 12 essais de sécurité

^c : inclus 22 essais de sécurité et 2 tirs de combat

Les essais atmosphériques qui retiennent prioritairement l'attention au regard des incidences environnementales et sanitaires, sont détaillés dans le tableau ci-après pour chaque site d'essais avec les estimations de répartition de la puissance dégagée (locale et régionale, dans la troposphère et dans la stratosphère).

Essais nucléaires atmosphériques pour chaque site

³ Rapport 2000 (annexe C) de l'UNSCEAR- Comité scientifique des Nations-Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants.

Sites	Nombre d'essais	Puissance (en Mégatonnes)			Répartition de la puissance de fission (en Mégatonnes)		
		Fission	Fusion	Total	Locale et régionale	Troposphere	Stratosphere
Chine							
Lop Nor	22	12.2	8.5	20.72	0.15	0.66	11.40
France							
Algeria	4	0.073	0	0.073	0.036	0.035	0.001
Fangataufa	4	1.97	1.77	3.74	0.06	0.13	1.78
Mururoa	37	4.13	2.25	6.38	0.13	0.41	3.59
Total	45	6.17	4.02	10.20	0.23	0.57	5.37
Royaume-Uni							
Monte Bello Island	3	0.1	0	0.1	0.050	0.049	0.0007
Emu	2	0.018	0	0.018	0.009	0.009	0
Martlinga	7	0.062	0	0.062	0.023	0.038	0
Malden Island	3	0.69	0.53	1.22	0	0.56	0.13
Christmas Island	6	3.35	3.30	6.65	0	1.09	2.26
Total	21	4.22	3.83	8.05	0.07	1.76	2.39
Etats-Unis							
New Mexico	1	0.021	0	0.021	0.011	0.010	0
Japan (combat use)	2	0.036	0	0.036	0	0.036	0
Nevada	86	1.05	0	1.05	0.28	0.77	0.004
Bikini	23	42.2	34.6	76.8	20.3	1.07	20.8
Enewetak	42	15.5	16.1	31.7	7.63	2.02	5.85
Pacific	4	0.102	0	0.102	0.025	0.027	0.050
Atlantic	3	0.0045	0	0.0045	0	0	0.005
Johnston Island	12	10.5	10.3	20.8	0	0.71	9.76
Christmas Island	24	12.1	11.2	23.3	0	3.62	8.45
Total	197	81.5	72.2	153.8	28.2	8.27	44.9
URSS							
Semipalatinsk	116	3.74	2.85	6.59	0.097	1.23	2.41
Novaya Zemlya	91	80.8	158.8	239.6	0.036	2.93	77.8
Totsk, Aralsk	2	0.040	0	0.040	0	0.037	0.003
Kapustin Yar	10	0.68	0.30	0.98	0	0.078	0.61
Total	219	85.3	162.0	247.3	0.13	4.28	80.8
Tous pays							
Total	543 ^a	189	251	440	29	16	145

^a y compris 22 essais de sécurité des Etats-Unis, 12 du Royaume-Uni et 5 de la France

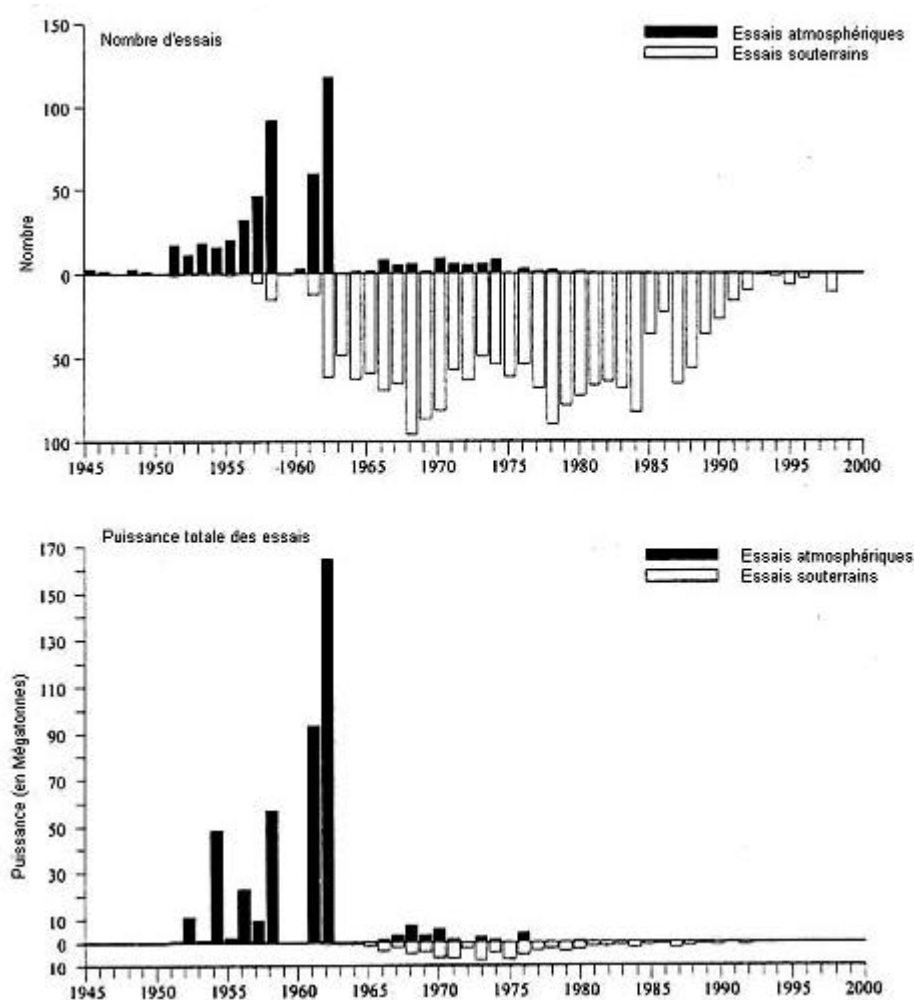
Ces décomptes et estimations ont sensiblement été affinés, voire révisés depuis les précédentes publications de l'UNSCEAR (1982, 1988 et 1993), ce qui explique d'autant mieux que la déclassification de nombreuses informations est intervenue depuis ces parutions antérieures.

Néanmoins, certaines imprécisions ou non-coïncidences, désormais beaucoup plus limitées, peuvent apparaître. Les origines en sont vraisemblablement très diverses (tirs en salve, expériences de sécurité décomptées différemment, absence de détonation, lors d'un essai, éventuellement « oublié » ou indication de puissance sous-évaluée) et ne paraissent pas pouvoir influencer sensiblement sur l'analyse de la réalité.

Les deux graphiques ci-dessous illustrent l'évolution du nombre de tirs (atmosphériques et souterrains) ainsi que le total de leur puissance dégagée. Ces représentations illustrent à la fois la concentration exceptionnelle de la puissance des tirs atmosphériques de septembre 1961 à décembre 1962, le grand

nombre d'essais souterrains mais aussi la très faible puissance dégagée par la totalité de ces derniers :

Essais nucléaires mondiaux



2. L'exposition aux radiations et les retombées

Avant de situer les retombées des essais nucléaires, il convient de les remettre en perspective dans l'ensemble des émissions radioactives perçues au niveau du sol en l'an 2000.

- Ainsi, la principale source de rayonnements ionisants pour l'homme est *la radioactivité naturelle* qui est estimée à $2,4 \text{ mSv}$ (dose efficace par personne annuellement, moyenne mondiale); les doses peuvent s'étager de 1 à 10 mSv et même davantage dans certains cas exceptionnels, ainsi dans l'Etat du Kerala en Inde.
- Les *examens médicaux* (diagnostic) constituant la deuxième source de radioactivité avec une moyenne mondiale de $0,4 \text{ mSv}$ par personne et par an (étagement de $0,04$ à 1 mSv).
- *Les retombées des essais* nucléaires atmosphériques constituant la troisième source avec $0,005 \text{ mSv}$ par personne et par an, sachant que la décroissance est régulière depuis le pic atteint en 1963 avec $0,15 \text{ mSv}$. Elle est naturellement plus élevée dans l'hémisphère nord que dans celui du sud.
- Les retombées de la catastrophe de Tchernobyl (le 26 avril 1986) sont la quatrième source avec une moyenne mondiale de $0,002 \text{ mSv}$ mais de $0,04 \text{ mSv}$ de moyenne pour l'hémisphère nord.
- Enfin, la cinquième source d'émission est constituée par l'ensemble des activités liées à la production d'énergie nucléaire avec $0,0002 \text{ mSv}$ (ou $0,2 \text{ } \mu\text{Sv}$) par personne et par an. Cette source a connu une augmentation avec la croissance du parc électro-nucléaire mais de l'autre une décroissance avec les progrès technologiques réalisés dans ce domaine.

Il y a lieu de noter que des situations très particulières et ponctuelles d'exposition à la radioactivité ne sont pas prises en compte ici et ne pourraient de toute façon être « moyennées » valablement. Il s'agit par exemple (par an)

✎ pour la *radioactivité naturelle* :

- de l'exposition due aux voyages en avion (3 mSv de dose individuelle annuelle pour les équipages),
- de l'exposition au radon dans des lieux de travail en sous-sol ($4,8 \text{ mSv}$) ou dans des activités minières en général ($2,7 \text{ mSv}$), le niveau pour les mines de charbon n'étant que de $0,7 \text{ mSv}$.

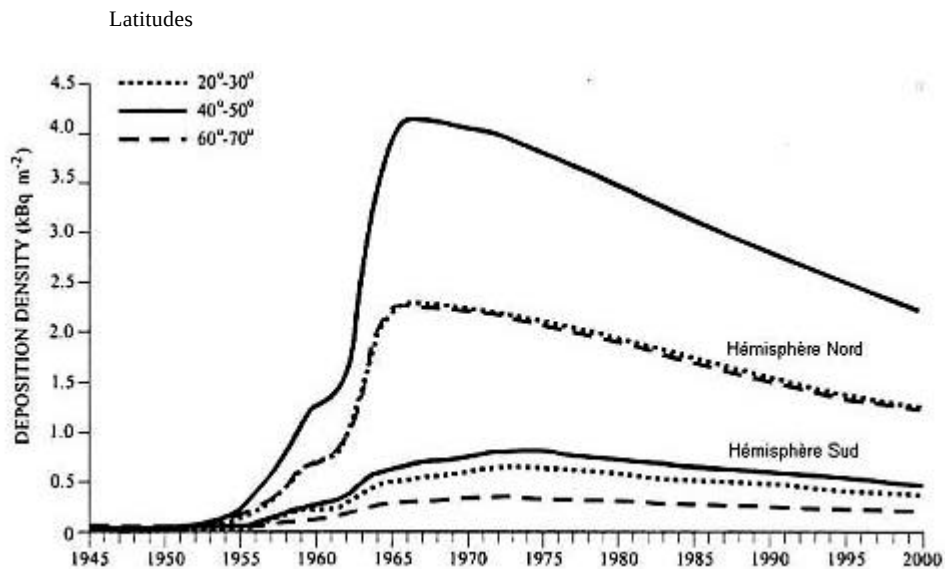
✎ pour la *radioactivité artificielle* :

- des traitements médicaux (et non des moyens diagnostics) faisant appel aux rayonnements ionisants,

- des expositions accidentelles durables telles que dans les unités de production d'armes nucléaires de l'ex-URSS : Tcheliabinsk (avec une dose collective efficace de 8 700 homme.Sv), Krasnoyarsk (1 200) et Tomsk (2000),
- d'expositions durables liées à des activités nucléaires mal maîtrisées : Tcheliabinsk et Hanford aux Etat-Unis par exemple.

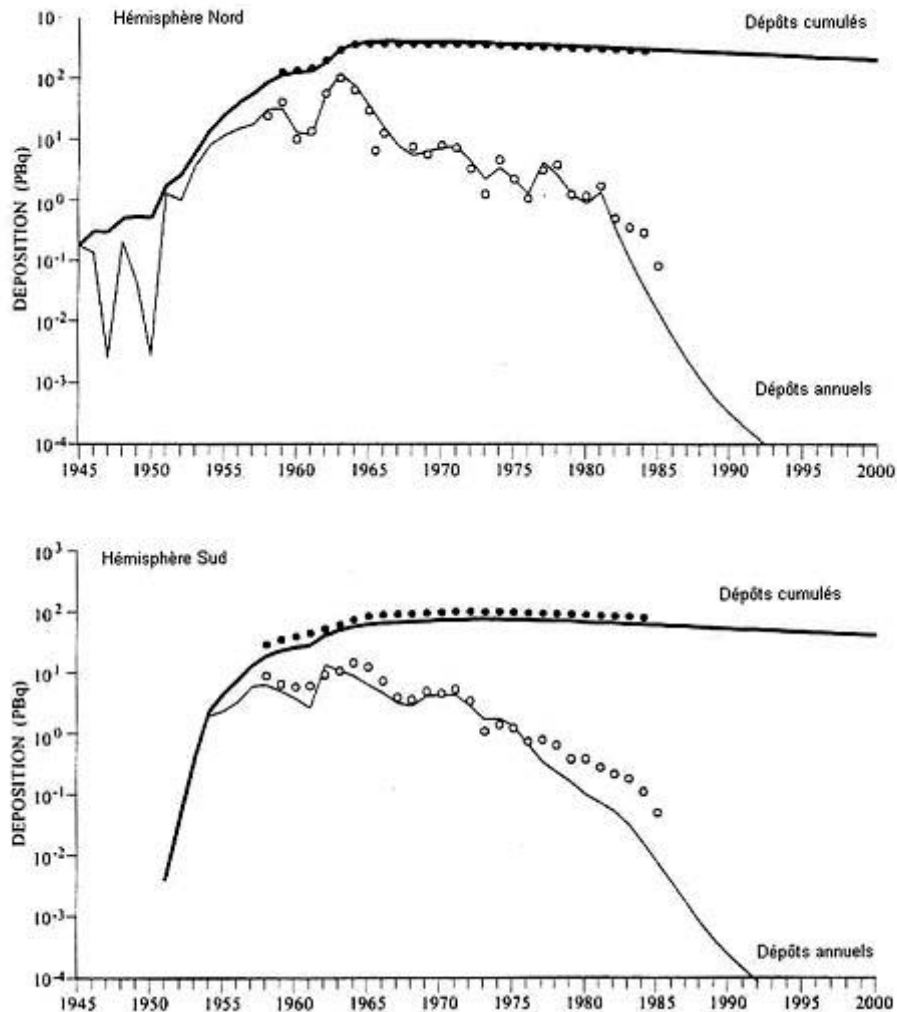
Sans entrer dans le détail de l'analyse des retombées par radionucléide en fonction de la puissance et de l'altitude de l'explosion qui font l'objet de présentations très techniques dans le rapport précité de l'UNSCEAR, on peut indiquer ici quelques repères :

- la densité de dépôt de césium 137 dans chacun des deux hémisphères illustrée par le graphique ci-dessous :



Densité des dépôts de césium 137 dans les deux hémisphères calculés avec le total des produits de fission avec un modèle atmosphérique

- les dépôts de strontium 90 sont représentés par les graphiques suivants : par hémisphère, les points figurent les résultats des relevés, les lignes ceux des calculs de modélisation atmosphérique :



Les doses annuelles efficaces des retombées mondiales dues aux essais nucléaires atmosphériques sont données en annexe. Il apparaît notamment au vu de ces données que la voie d'exposition externe était prédominante au moment des essais, les modes d'irradiation se partagent désormais à peu près également entre l'irradiation externe (53 %) et l'interne (47 %).

LES ESSAIS NUCLEAIRES FRANÇAIS

La décision de doter la France de l'arme atomique ayant été prise en février 1956, la question du choix d'un site destiné aux essais nucléaires s'est posée dès 1957. Le « groupe mixte des expérimentations nucléaires » est alors chargé de proposer ce choix au CEA, aux autorités militaires, et en dernier ressort au Gouvernement. La Polynésie et les îles Kerguelen sont un moment évoquées mais le choix se fixe en 1957 sur le Sahara, et plus particulièrement dans le secteur centre-ouest et centre de la partie alors sous souveraineté française de cet espace désertique.

Le régime habituel des vents qui permet une évacuation du nuage radioactif vers l'Est, pour peu que les principes de sécurité météorologique soient scrupuleusement respectés, a été, outre le caractère désertique du lieu, un facteur visiblement essentiel dans le choix.

Les trois autres états qui avaient précédé la France dans l'installation de centres d'expérimentations nucléaires avaient d'ailleurs fait le choix de zones désertiques continentales : le Nevada pour les Etats-Unis, le polygone de Semipalatinsk pour l'URSS et le désert d'Australie du Sud pour la Grande-Bretagne.

Seuls les Etats-Unis avaient d'abord commencé leurs essais aux îles Marshall puis les avaient menés concurremment sur le site du Nevada.

Le changement de site d'essais nucléaires était naturellement implicitement prévu avec la proclamation de l'indépendance de l'Algérie en juillet 1962, les recherches se portèrent sur la Polynésie française, plus particulièrement sur les atolls inhabités de Mururoa et de Fangataufa.

I – Les éventuelles incidences⁴ au Sahara

Le premier site d'essais se trouvait à 700 km au Sud de Colomb-Béchar, à côté de Reggane dans le Tanezrouf. La base avancée pour le tir était à Hamoudia. Cet ensemble, qui comprenait tous les moyens logistiques nécessaires

⁴ Cet terme « d'incidences » est celui qui figure dans le texte de la saisine elle-même.

(aérodromes, forages pour l'alimentation en eau, base-vie située à 15 km de Reggane), était dénommé CSEM (Centre Saharien d'Expérimentations Militaires); c'est là qu'ont eu lieu les quatre premiers tirs atmosphériques du 13 février 1960 au 25 avril 1961.

Le seul secteur comportant une population sédentaire notable se trouvait au Nord de Reggane et dans la vallée du Touat. Les essais en galerie eurent lieu, quant à eux, plus au Sud et à l'Est à proximité d'In Ecker, à 150 km au Nord de Tamanrasset, au CEMO (Centre d'Expérimentations Militaires des Oasis).

Au total, la population saharienne vivant dans un rayon de 100 km autour d'In Ecker ne dépassait pas deux mille personnes.

Les effectifs des personnels civils et militaires affectés aux essais comptaient environ 10 000 personnes au CSEM à Reggane et deux mille logées en base-vie au CEMO à In Ecker.

1. Les principes généraux de sécurité

- La sécurité des essais nucléaires était assurée par la surveillance du champ de tir et de l'ensemble du territoire.
- Susceptible de recevoir des retombées supérieures aux normes, ce territoire a souvent été déterminé assez largement par rapport aux retombées effectives qui ont pu y être observées : ainsi pour le tir Gerboise rouge (moins de 5 kt), la zone contrôlée s'étendait sur 230 km ; la « courbe » des isodoses à 5 mSv du tir montre que la longueur maximale a été, en fait, de moins de la moitié de cette distance (cf. figure en annexe).
- La surveillance météorologique était naturellement l'élément essentiel de la sécurité relative aux incidences du tir atmosphérique sur l'environnement et la santé. Pour ce qui concerne le Sahara, le Groupement Opérationnel des Expérimentations Nucléaires disposait, outre les données fournies par les réseaux mondiaux, des observations disponibles par un système de radars couvrant tout le Sahara pour les mesures jusqu'à de très hautes altitudes et des observations des postes locaux pour la mesure des vents dans les basses et moyennes couches de l'atmosphère. Le rôle prépondérant du facteur météorologique était assuré dans la chaîne de prise de décisions. Dans l'ouvrage « Les essais nucléaires français » l'enchaînement des décisions est décrit⁵ :

⁵ « Les essais nucléaires français », sous la direction d'Yves Le Baut (Bruylant éd. 1996)

« L'exploitation des mesures de météorologie est très étroitement liée aux décisions à prendre au niveau du GOEN⁶ dans le cadre d'une chronologie des opérations de préparation du tir, de conduite des opérations avant et après l'explosion.

Avant le tir, à partir des prévisions à 48 heures, les prévisions s'affinent pour fournir avec un préavis de dix heures des indications précises et sûres en vue du déclenchement du tir. Les tracés des retombées appliquées aux cartes du Sahara indiquent alors très nettement les risques ou l'absence de risques.

Une fois acquis le « feu vert » politique et l'assurance que tout est prêt, principalement du côté du CEA, et aussi du côté des intervenants militaires, la décision de tirer ne dépend plus que de la météorologie. Il faut alors saisir la bonne occasion donnée par les prévisions dans les basses couches, souvent très instables.

Dans le cas des tirs souterrains à In-Ecker, l'essentiel des prévisions météorologiques pouvant intervenir dans la décision de tirer concerne les basses couches et même les très basses couches de l'atmosphère ».

Cette stricte soumission aux exigences de la situation météorologique a permis d'éviter tout incident et a fortiori tout accident pendant des tirs aériens qui se faisaient selon une technique diffusant une pollution radioactive certaine, celle du tir sur tour.

2. La sécurité radiologique

L'ensemble des règles et des pratiques de surveillance radiologiques des personnels, des populations et de l'environnement était déterminé par la Commission Consultative de Contrôle (CCC) créée en 1958.

A) Les normes

- Pendant la durée des essais, la France s'est conformée en permanence aux recommandations des organisations internationales compétentes, en particulier celles émises par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), recommandations reprises dans la réglementation européenne (J0

⁶ Groupe opérationnel des expérimentations nucléaires

des 20 février 1959, 9 juillet 1962 et 2 juin 1965) puis nationale (JO du 20 juin 1966)⁷

- Les personnes pouvant être soumises aux effets de la radioactivité générée par les essais étaient classées en deux catégories : la première : le personnel directement lié aux essais, le personnel des armées, le personnel du CEA et des entreprises, les travailleurs employés sur les sites ; la deuxième : les populations voisines du champ de tir.

Doses maximales admissibles :

Pour les personnels de la 1^{ère} catégorie, les normes d'irradiation globale, c'est-à-dire concernant l'ensemble de l'organisme, avaient été fixées par la CCS (Commission Consultative de Sécurité) le 5 novembre 1958, suivant les recommandations de la CIPR, soit :

- La dose maximale admissible est calculée en fonction de l'âge et d'une dose moyenne annuelle de 50 mSv. La dose délivrée à l'organisme entier à l'âge N ans ne devant pas dépasser : 50 mSv (N - 18).
- La dose maximale cumulée pendant une période de 13 semaines consécutives peut atteindre 30 mSv.
- Lors d'une irradiation externe exceptionnelle concertée, la dose ne doit pas dépasser la limite de 120 mSv à l'organisme entier, 300 mSv à la thyroïde et à l'os, et 150 mSv aux autres organes.

Pour les populations, la dose maximale admissible annuelle était fixée par la CCS à 15 mSv en 1960 puis 5 mSv à partir de 1961.

- Les concentrations maximales admissibles dans l'air, les eaux de boisson (CMA) et les Quantités Maximales Admissibles dans l'organisme (QMA) ont été également fixées par la CCS en suivant les recommandations de la CIPR (rapport de la Commission de 1959).

B) Le contrôle de la radioactivité

Le contrôle des retombées se faisait à deux niveaux :

- *proche* : des mesures systématiques et répétées de la contamination du sol et de l'air étaient effectuées à proximité des

⁷ Les unités utilisées à l'époque ont été converties ici, pour l'essentiel, en unités du Système International actuel :

- pour l'exposition externe : 1 Roentgen = 1 rad $\approx$ 1 rem $\approx$ 10 mSv (milliSievert) $\approx$ 10 mGy
- pour le débit de dose : 1 Roentgen/h = 1 rad/h $\approx$ 10 mGy/h (milliGray)
- pour l'environnement : 1 pCi (picocurie) = 37 mBq (milliBecquerel)

expériences aériennes et dans l'axe des retombées, là où une contamination importante pouvait se produire. Les mesures étaient réalisées par des unités spécialisées à terre ou par avion. Elles permettaient de délimiter la "zone de retombée" : quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres, le jour J de l'expérimentation. Du fait des périodes très courtes de nombreux radioéléments, les dimensions de la zone où la radioactivité était directement détectable décroissaient très vite (décroissance de la radioactivité d'un facteur 100 entre une heure et 48 heures après le tir).

- *lointain* : à l'extérieur de la zone dans laquelle la radioactivité était directement mesurable, les traces d'activité dans les sols, l'air, les précipitations, les végétaux, l'eau de boisson ou les éléments étaient détectables uniquement par des mesures fines, effectuées en laboratoire à partir de prélèvements. Un réseau de surveillance implanté principalement au Sahara, mais aussi dans les Etats de la Communauté et dans quelques ambassades, permettait d'effectuer des prélèvements dans les différents milieux (air, sol,...) et ainsi d'évaluer les retombées plus lointaines et à l'échelle mondiale.

Ce réseau (figure 1) a été conservé pendant toute la durée des essais aériens et souterrains.

Le suivi des populations locales et du personnel participant aux essais

- Lors des expériences aériennes, la sécurité radiologique des populations locales a été assurée par :
 - le blocage des pistes chamelières et le contrôle de l'absence de populations nomades des zones pouvant être affectées par les retombées ;
 - des prévisions météorologiques permettant de garantir que les retombées proches des quatre expériences aériennes ne touchent que de vastes étendues désertiques (cf. supra) ;
 - un contrôle étendu de la radioactivité dans l'environnement permettant d'interdire l'accès à la zone des retombées proches.
 - des mesures ponctuelles de recherche de contamination interne (spectrométrie ?) effectuées sur des populations sédentaires résidant à proximité des sites et sur des nomades transitant dans la région.

- Lors des expériences souterraines en galerie, la sécurité radiologique des populations locales a été assurée par :
 - l'importance des données et des prévisions météorologiques qui permettaient de s'assurer qu' en cas de confinement imparfait le nuage radioactif n'affecterait que des zones désertiques.
 - les nombreuses mesures de radioactivité dans l'environnement à plus de 100 km du point zéro
- Toute personne participant aux essais et susceptible d'être exposée aux rayonnements ionisants, qu'elle soit militaire, du CEA ou des entreprises faisait l'objet d'une surveillance médicoradiobiologique (visite médicale, bilan sanguin, dosimétrie de l'exposition externe et éventuellement mesure de la contamination interne par spectrométrie ?).

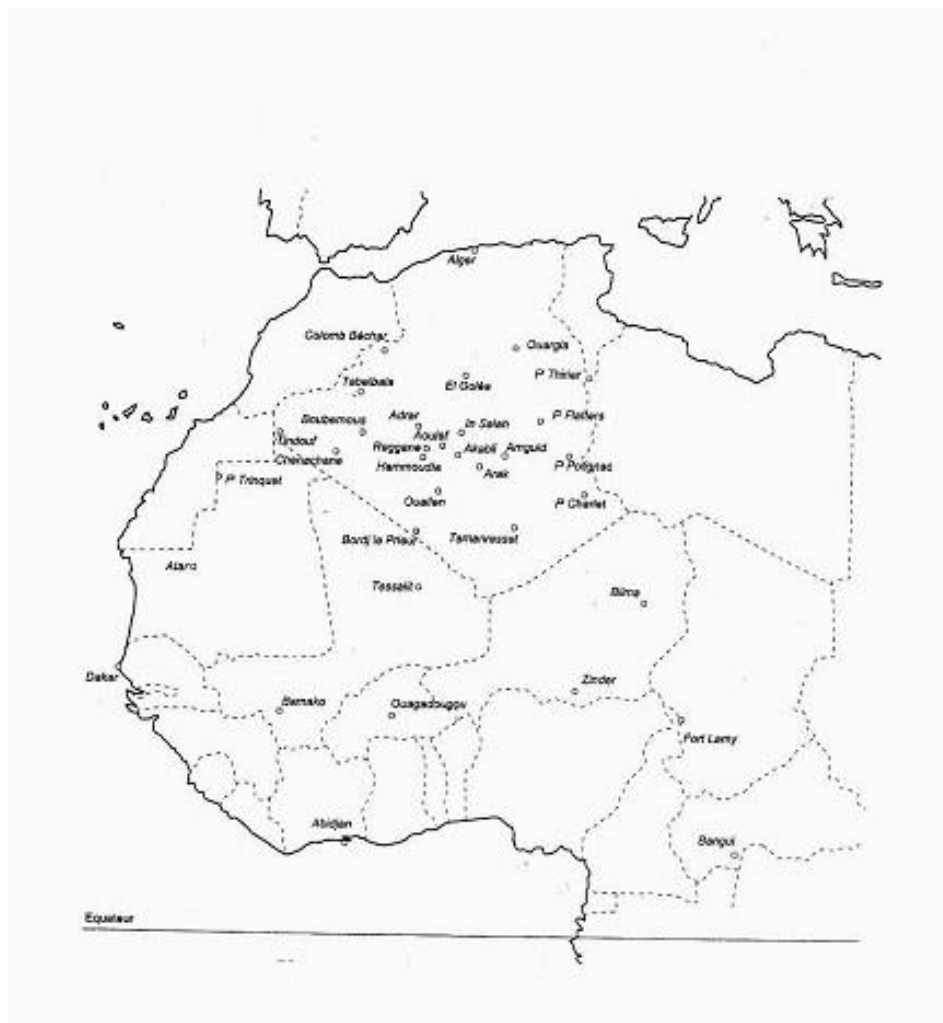


Figure 1 : implantation du réseau de postes de contrôle de radioactivité

La dosimétrie de l'exposition externe individuelle a été pratiquée dès le début des essais et ce, d'une manière systématique : 24 000 personnes ont ainsi été suivies dont près de 8 000 pour les quatre tirs aériens. A cet égard, il y a lieu de signaler qu'il semble bien que parmi les autres puissances nucléaires on ne trouve pas de pratiques systématiques de surveillance dosimétrique et que dans certains cas, on en soit même très loin.

3. Les essais atmosphériques : caractéristiques et incidences

3.1. L'ensemble des faits

Ces caractéristiques et les incidences des quatre tirs aériens dénommés « Gerboise » en nom de code sont synthétisées dans le tableau ci-après :

Expérience	Date (heure locale)	Mode	Puissance (kt)	Axe principal	Retombées radioactives proches (en Gy/h à 1 m à H + 1)	Retombées radioactives lointaines (en Bq/m ³ β dans l'air)	Conséquences radiologiques sur les personnes
GERBOISE BLEUE	13.02.60 à 7 h 04	tour (100 m)	70	vers l'Est (105°)	- à 300 m autour du point zéro - à 2,5 km - jusqu'à 30 km - jusqu'à 150 km - retombe sur postes ARAK à 400 km (0,7 mGy/h à H+4) et AKABLI à 150 km (<0,1 mGy/h)	- FORT LAMY (2400 km) - OUAGADOUGOU (1700 km) - ABIDJAN (2600 km) - KHARTOUM (3200 km) - DAKAR (2400 km) 150 (J+1) 4 (J+3) 4 (J+5) 0,4 (J+6) 0,04 (J+9)	Personnel du champ de tir - 4 contaminations de la peau - Dose maxi : 97 mSv Population civile - spectro γ sur 125 personnes de la palmeraie de REGGANE : pas d'activité détectée.
GERBOISE BLANCHE	01.04.60 à 6 h 17	au sol	< 5	vers le Sud (195°)	- à 80 m autour du point zéro - jusqu'à 3 km - jusqu'à 10 km - jusqu'à 25 km - retombe sur postes OUALLEN à 200 km (0,01 mGy/h à H+8) et BIDON V à 450 km (<0,001 mGy/h)	- TAMANRASSET (800 km) - BAMAKO (1900 km) - KHARTOUM (3200 km) - DAKAR (2400 km) 4 (J+1) 4 (J+3) 4 (J+4) 0,04 (J+4)	Personnel du champ de tir - Dose maxi : 61 mSv
GERBOISE ROUGE	27.12.60 à 7 h 28	tour (50 m)	< 5	vers le Sud (190-210°)	- à 200 m autour du point zéro - jusqu'à 6 km - jusqu'à 15 km	- ATAR (1700 km) - DAKAR (2400 km) 370 (J+2) 4 (J+4)	Personnel du champ de tir - 5 contaminations de la peau - Dose maxi : 100 mSv Population civile - spectro γ sur 70 nomades à TAMANRASSET : pas d'activité détectée.
GERBOISE VERTE	25.04.61 à 6 h 05	tour (50 m)	< 5	vers l'Ouest (240°)	- à 250 m autour du point zéro - jusqu'à 5 km - jusqu'à 8,5 km - jusqu'à 20 km	- AMGUID (550 km) - ARAK (400 km) - EL GOLEA (600 km) - ADRAR (200 km) 37 (J+1) 370 (J+1) 370 (J+3) 37 (J+3)	Personnel du champ de tir - 42 contaminations de la peau - Dose maxi : 42 mSv

Synthèse des expérimentations aériennes

Le premier tir « Gerboise bleue » (13 février 1960) remplit les objectifs fixés tant pour le CEA que pour les Armées, notamment au regard de la puissance atteinte qui était prévue de 60 à 70 kt et qui se réalisa au maximum de cette hypothèse. Sans entrer dans l'analyse technique, il convient de rappeler que la puissance effective du tir ne peut être prévue avec exactitude avant le tir.

Pour le troisième tir, « Gerboise rouge » (27 décembre 1960), il semblerait précisément que la puissance effective, inférieure à ce qui était fixé comme objectif, ait posé un problème de validité qui fit l'objet de recherches récurrentes.

Le deuxième tir « Gerboise blanche » (1^{er} avril 1960) avait été effectué, quant à lui, peu de temps après le premier avec « l'engin de secours » prévu au cas où ce dernier n'aurait pas ou mal fonctionné. D'une puissance volontairement beaucoup plus limitée, il fut réalisé sur une plate-forme au niveau du sol ; cette technique risquait de se révéler nettement plus polluante : formation d'un cratère et retombées d'une quantité importante de particules lourdes contaminées sur une étendue non négligeable. A cette fin, l'emplacement du tir (point zéro) fut déterminé beaucoup plus au Sud (une quinzaine de kilomètres) que l'emplacement de « Gerboise bleue » et de ceux prévus pour les tirs suivants.

Toutefois, les mesures ont montré que cette contamination s'est révélée nettement plus limitée que ce que l'on avait craint.

Le quatrième et dernier essai atmosphérique du Sahara (« Gerboise verte ») fut marqué par une circonstance politique particulière : le putsch des généraux du 22 avril 1961 venait de se déclencher et il apparaît que le tir lui-même en a été quelque peu anticipé : il a eu lieu le 25 avril. Les conditions météorologiques, sans être dangereuses, n'étaient pas favorables à une bonne exploitation des données.

Globalement, et pour l'ensemble des tirs au sein de la région complètement désertique où portaient les vents, la zone dans laquelle les retombées induisaient un débit de dose supérieur à 0,1 mGy/heure, 24 heures après le tir, avait une longueur comprise entre 10 et 150 km, et une largeur de 10 à 20 km en fonction de l'énergie mise en œuvre au cours du tir.

Quelques mois après l'essai, par le jeu de la décroissance radioactive, la zone dans laquelle le débit de dose restait supérieur à 0,1 mGy/heure était réduite à un cercle ayant un rayon de 100 à 300 mètres.

L'annexe 1 (en couleur) montre par les « plumes » de chaque tir les doses qu'aurait reçu une population hypothétique présente dans le périmètre des retombées (à l'exception du polygone de tir lui-même).

3.2. Les incidences sanitaires sur le personnel et les populations locales

Sur près de 8 000 résultats de mesures de dosimétrie externe, 97 % sont inférieurs à 5mSv et les 6valeurs les plus élevées sont comprises entre 50 et 100 mSv. La dose reçue, par les pilotes des «*Vautours*»⁸ chargés d'effectuer les prélèvements dans le nuage, n'a pas dépassé les 100 mSv. Il y a lieu de signaler à cet égard que les limites d'exposition pour ces personnels étaient fixées à un niveau qui était au quart de celui de leurs homologues américains, cela, il est vrai, quelques années plus tôt, au Nevada et aux îles Marshall.

Des mesures anthropogammamétriques de contrôle de la contamination interne ont été effectuées après les tirs de «*Gerboise*» sur environ 195 personnes (125 civils et 70 nomades). Elles ont donné des résultats négatifs (absence de contamination). Globalement l'exposition des populations locales imputable aux essais aériens français a été faible et toujours inférieure aux recommandations de la CIPR concernant les populations civiles.

3.3. Les résultats des mesures dans l'environnement

Au-delà de quelques centaines de kilomètres, le passage d'aérosols radioactifs ou les traces d'activité déposées sont alors détectés par des méthodes de mesures fines en laboratoire. Ces mesures portent sur la radioactivité de l'air, des précipitations, de l'eau, du sol, des végétaux, des produits alimentaires.

- La radioactivité de l'air est présentée sous forme graphique (tableau). Les valeurs trouvées sont généralement inférieures à la norme de concentration admissible courante. Elles la dépassent toutefois ponctuellement dans quelques endroits. Les valeurs les plus élevées, comprises entre 370 et 3700 Bq/m³, ont été atteintes à Arak, Amguid et Ouallen; leur durée n'a pas excédé quelques heures. Des valeurs comprises entre 37 et 370 Bq/m³ ont été observées à Amguid, Arak, Ouallen, Fort Lamy, pour une durée inférieure dans tous les cas à quatre jours. Le dépassement de la concentration admissible en permanence, ne s'est donc manifesté que pour des durées très courtes.

⁸ Biréacteur bombardier en service dans l'armée de l'air à cette époque et utilisé notamment dans cette fonction jusqu'à la fin des essais atmosphériques en Polynésie.

Les doses ont été calculées pour les points où ont été relevées les plus fortes concentrations ; elles sont données dans le tableau ci-dessous :

POSTES DE CONTROLE	DOSES (mSv)
AMGUID	0,100
ARAK	0,200
FORT LAMY	0,120
OUAGADOUGOU	0,100
OUALLEN	0,600
ZINDER	0,060

Pour les autres stations, les doses sont infiniment plus faibles. En résumé, on doit donc remarquer que dans tous les cas, les résultats sont très en dessous de la norme de 5 mSv par an. De plus, les postes de Bordj Arak et de Ouallen où les niveaux de radioactivité étaient les plus élevés, ne comportaient pas de population sédentaire en dehors d'une petite garnison militaire pour laquelle toutes les mesures de protection avaient été prises.

- La radioactivité des précipitations est présentée par le graphique (page 33). Parmi les pointes enregistrées en 1960 et 1961, seules sont significatives celles correspondant au premier essai (Gerboise bleue). Il est intéressant de comparer ces pointes aux valeurs observées en 1958 et en 1959 à la suite des essais nucléaires étrangers. Pour la plupart des stations, les niveaux maximum atteints en 1960 sont de l'ordre du dixième des niveaux enregistrés en 1959.

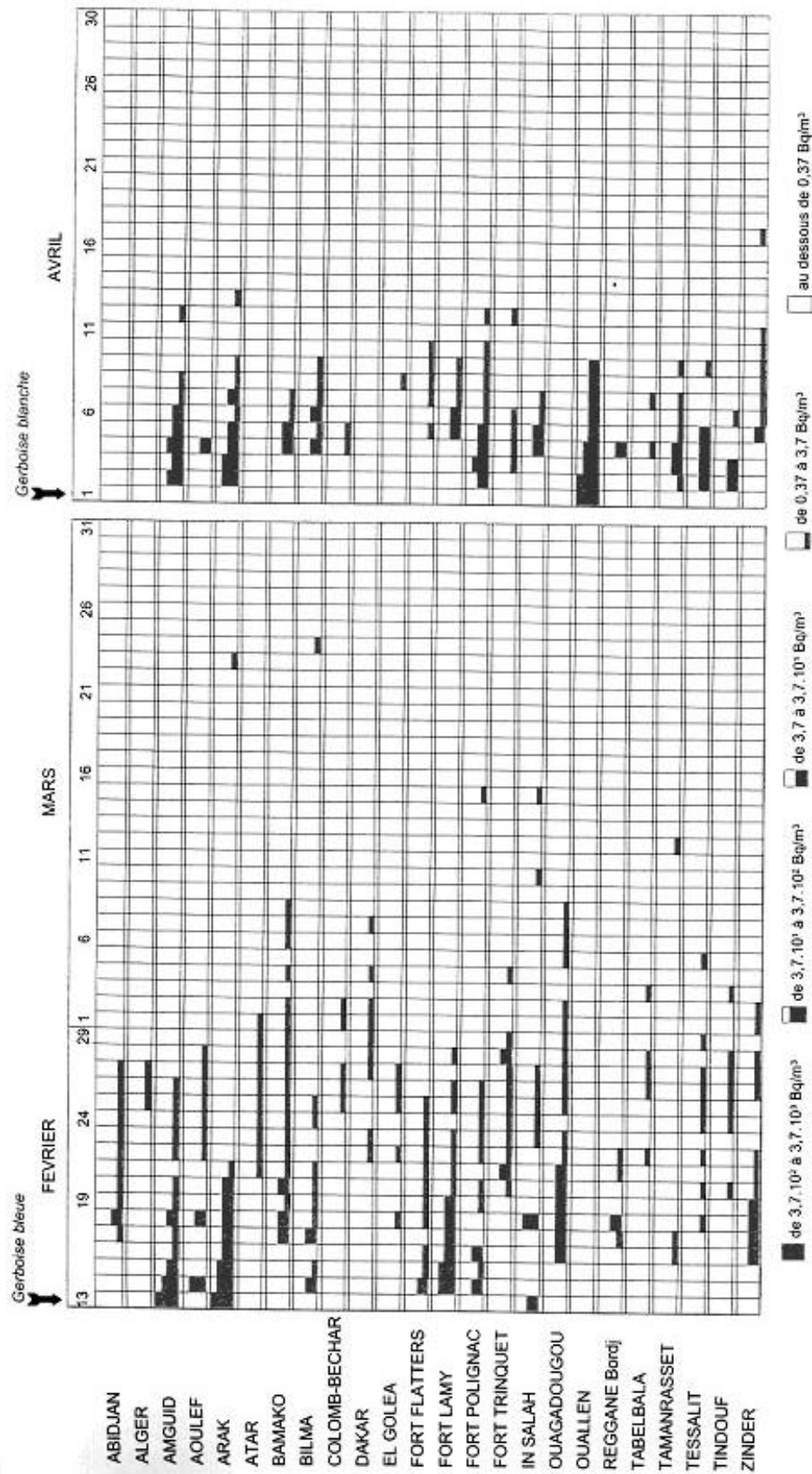
- Pour la radioactivité de l'eau, les valeurs les plus élevées ont été décelées immédiatement après l'explosion Gerboise bleue à Bordj Arak, où l'on a mesuré de l'ordre de 10^7 Bq/m³, et 4.10^6 à 8.10^6 Bq/m³ à El Golea et à In Salah. Ces valeurs sont redescendues rapidement au-dessous de la norme eau de boisson pour les populations. Il faut noter que pour des eaux à forte teneur en sels, ce qui est précisément le cas en ces points, la radioactivité naturelle due principalement au potassium 40 (⁴⁰K), vient s'ajouter, lors des mesures, à l'activité due aux retombées.

- Lorsqu'il ne s'agit pas de plantes alimentaires, la mesure de la radioactivité des végétaux n'a qu'une valeur indicative en l'absence de normes. Il s'agissait surtout de s'assurer, grâce à des contrôles échelonnés sur plusieurs mois, qu'il ne se manifeste pas de phénomènes d'accumulation. Ce but a été atteint car on a pu vérifier que l'activité des plantes est restée de l'ordre de grandeur de la radioactivité naturelle dans la majorité des cas.

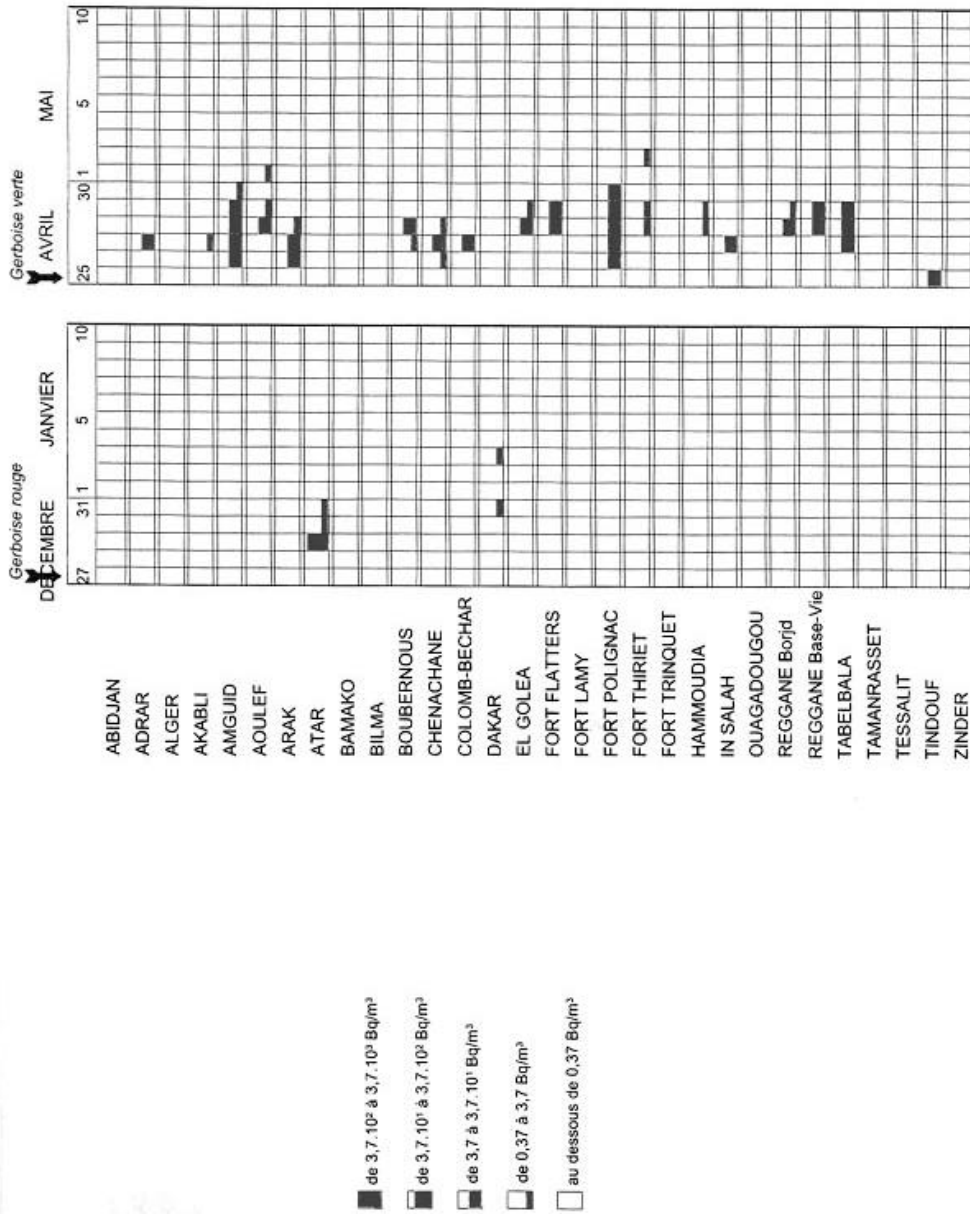
- Les contrôles effectués sur les produits alimentaires n'ont décelé aucune contamination présentant un risque sanitaire. Aucune restriction de consommation n'a donc été prescrite. La teneur en substances radioactives des aliments prélevés aux points où un accroissement de la radioactivité de l'air avait

été observé, se révèle être du même ordre que celle que l'on observe normalement en Europe, donc parfaitement acceptable sur le plan sanitaire.

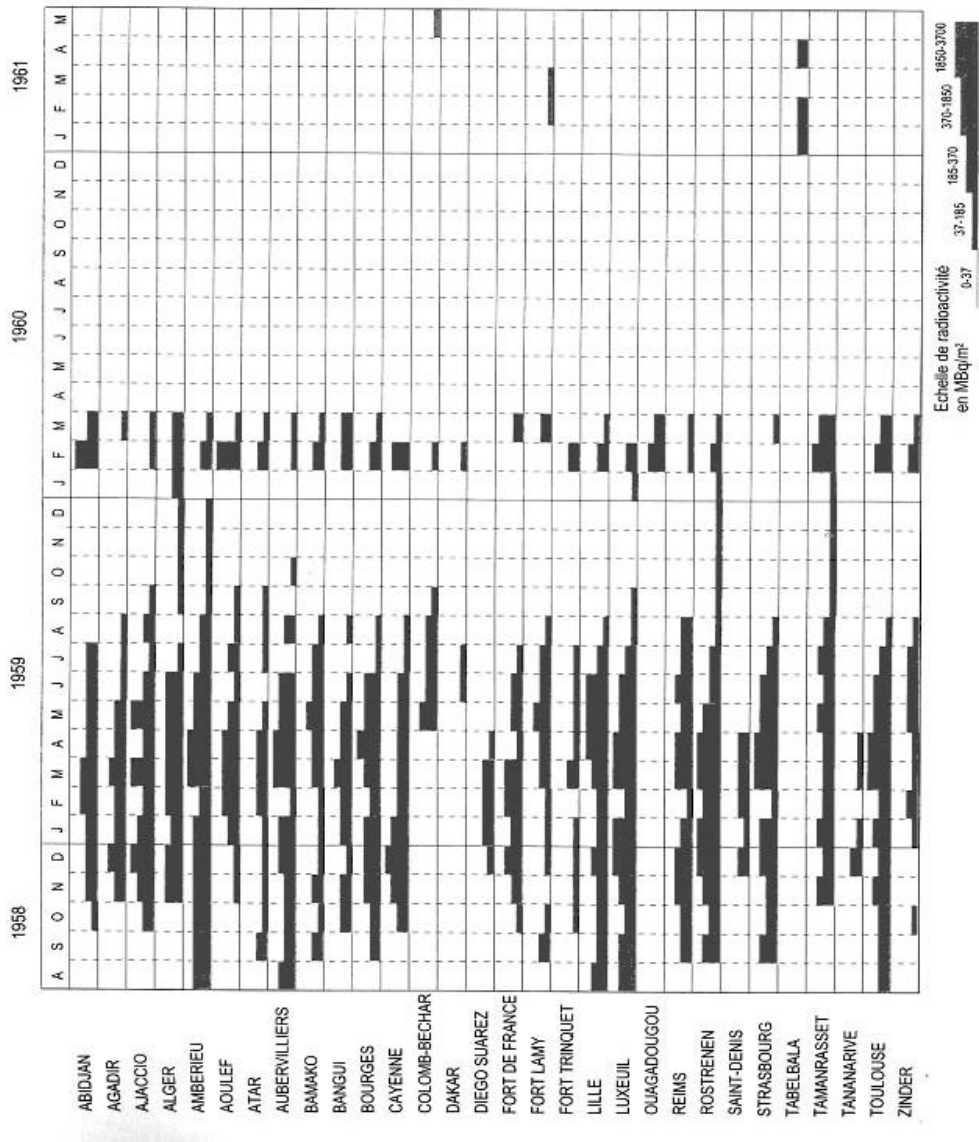
Une étude particulièrement poussée a été effectuée sur le lait car il constitue l'élément le plus représentatif de la chaîne alimentaire. L'étude a porté sur les teneurs en césium 137 (^{137}Cs) et en strontium 90 (^{90}Sr). Les prélèvements effectués en France au cours de l'année 1959 et de l'année 1960, ont permis de déceler une légère diminution des teneurs en ^{137}Cs et en ^{90}Sr . Les prélèvements effectués en Europe et en Afrique, à la suite des expériences nucléaires françaises, ont donné les valeurs en général plus faibles qu'en France.



La radioactivité atmosphérique lors des expérimentations aériennes (CSEM).



La radioactivité atmosphérique lors des expérimentations aériennes (CSEM) (suite)



La radioactivité des précipitations en Europe et en Afrique de 1958 à 1961.

4. Les essais nucléaires souterrains

Le moratoire sur les essais nucléaires atmosphériques appliqué de facto depuis la fin de l'année 1958 par l'Union soviétique, les Etats-Unis et la Grande-Bretagne fut rompu en septembre 1961 par l'URSS, suivie en avril 1962 par les Etats-Unis. Entre temps, la France, qui était la seule à pratiquer en 1960 et 1961 des essais atmosphériques, décida d'y mettre un terme en passant aux essais souterrains. Elle s'engagea donc dans cette voie, notamment afin de répondre aux critiques relatives aux retombées, au moment où l'URSS allait pratiquer un nombre de tirs très élevé (136) pour une puissance considérable dont le plus important essai jamais réalisé : celui de 50 Mt le 30 octobre 1961 en Nouvelle Zemble ; les Etats-Unis de leur côté ont pratiqué d'avril 1962 à novembre 1962 40 tirs dont les deux plus élevés à 7,45 et 8,3 Mt.

Les implantations du CEMO (Centre d'Expérimentations Militaires des Oasis) étaient situées dans le Hoggar et les expérimentations avaient lieu plus particulièrement dans le massif granitique du Tan Afella près d'In-Ecker, à 150 km au Nord de Tamanrasset.

Ces tirs souterrains ont été conçus de façon comparable aux techniques mises en œuvre à l'époque par les Américains du Nevada.

Le massif lui-même a un pourtour de 40 km environ et se situe entre 1500 et 2000 m d'altitude, le plateau environnant étant à 1000 m d'altitude. Les tirs avaient lieu au fond de galeries creusées horizontalement dans la montagne et dont la longueur totale était d'un kilomètre approximativement. La galerie de tir proprement dite se terminait en colimaçon de telle manière que l'effet mécanique du tir sur la roche provoque la fermeture de la galerie. Un bouchon de béton fermait l'entrée de la galerie à la sortie. Sur les côtés de la galerie étaient aménagées des recoupes où de nombreux appareils de mesures et d'enregistrement étaient placés.

L'essentiel, sinon la totalité des produits et éléments radioactifs restait ainsi confiné dans la cavité créée par le tir. Entre le 3 novembre 1961 et le 16 février 1966, il fut ainsi procédé à treize tirs dont les caractéristiques sont indiquées ci-après :

Date	Nom de code	Puissance
7 novembre 1961	Agathe	Moins de 20 kt
1 ^{er} mai 1962	Béryl	Moins de 30 kt
18 mars 1963	Emeraude	Moins de 20 kt
30 mars 1963	Améthyste	Moins de 5 kt
20 octobre 1963	Rubis	Moins de 100 kt
14 février 1964	Opale	Moins de 5 kt
15 juin 1964	Topaze	Moins de 5 kt
28 novembre 1964	Turquoise	Moins de 20 kt
27 février 1965	Saphir	Moins de 150 kt
30 mai 1965	Jade	Moins de 5 kt
1 ^{er} octobre 1965	Corindon	Moins de 5 kt
1 ^{er} décembre 1965	Tourmaline	Moins de 20 kt
16 février 1966	Grenat	Moins de 20 kt

5. Bilan radiologique des essais souterrains

Quatre essais souterrains sur treize n'ont pas été totalement contenus ou confinés : Béryl, Améthyste, Rubis et Jade. Les deux premiers cités ont entraîné une sortie de laves radioactives. Dans les deux autres cas, les sorties limitées à des radioéléments gazeux ou volatils n'ont pas provoqué d'expositions significatives au plan de la santé du personnel et des populations.

5.1. L'accident Béryl (1^{er} mai 1962)

Pour assurer le confinement de la radioactivité, le colimaçon était calculé pour que l'onde de choc le ferme avant l'arrivée des laves. Lors de la réalisation de cet essai, le 1^{er} mai 1962, l'obturation de la galerie a été trop tardive. Une fraction égale à 5 à 10 % de la radioactivité est sortie par la galerie, sous forme de laves et de scories projetées qui se sont solidifiées sur le carreau de la galerie, d'aérosols et de produits gazeux formant un nuage qui a culminé jusqu'aux environs de 2600 m d'altitude à l'origine d'une radioactivité détectable jusqu'à quelques centaines de kilomètres.

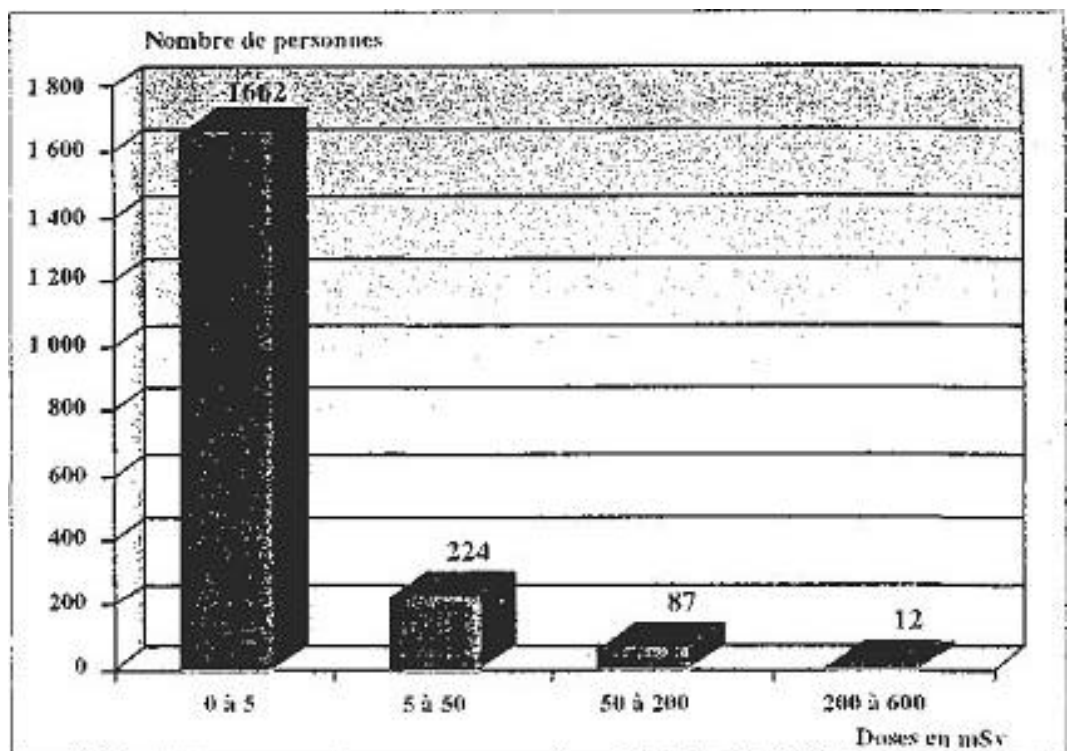
Le nuage radioactif formé était dirigé plein Est. Dans cette direction, la contamination atmosphérique était significative jusqu'à environ 150 km, distance sur laquelle il n'y avait pas de population saharienne sédentaire. Localement, en revanche une contamination substantielle (induisant une exposition supérieure à 50 mSv) a touché une centaine de personnes.

Les conséquences sanitaires

La trajectoire du nuage est passée au-dessus du poste de commandement où étaient regroupées les personnalités (notamment deux ministres, MM. Pierre Messmer et Gaston Palewski) et le personnel opérationnel. Malgré le port du masque respiratoire et une évacuation rapide (entre H+2 minutes où le débit de dose était inférieur à 1 mGy/h et H + 8 minutes où le débit de dose était de 3 Gy/h), une quinzaine de personnes ont reçu un équivalent de dose de quelques centaines de millisieverts. L'irradiation a été essentiellement d'origine externe, les masques ayant été correctement utilisés.

Près de 2000 personnes participaient à la réalisation de cet essai. La répartition des résultats de la dosimétrie externe est résumée dans le graphique ci-dessous.

Répartition des résultats de la dosimétrie externe pour l'essai Béryl en fonction des intervalles de doses en mSv.



Neuf personnes situées dans un poste isolé ont traversé la zone contaminée après avoir, au moins temporairement, ôté leur masque. Dès leur retour en base vie (H+6), elles ont fait l'objet d'une surveillance clinique, hématologique (évolution des populations cellulaires sanguines) et radiologique (spectrogoniométrie, mesures d'activité dans les excréta).

Les équivalents de dose engagée reçus par ces personnes ont été évalués à environ 600 mSv.

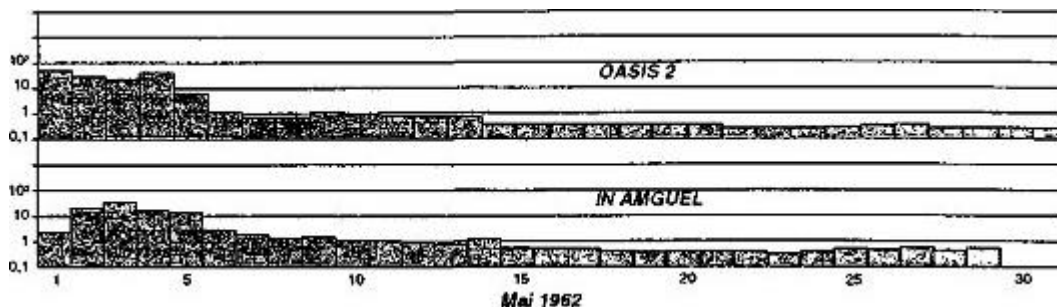
Ces neuf personnes ont été ensuite transportées à l'hôpital militaire Percy à Clamart pour surveillance et examens radiobiologiques complémentaires. Le suivi de ces neuf personnes n'a pas révélé de pathologie spécifique.

Le contrôle de la contamination interne, par examens spectrométriques, a montré que celle-ci était faible. Dans le cas particulier des 9 personnes les plus exposées, la dose engagée par cette voie est évaluée à moins de 10 mSv, valeur négligeable par rapport à celle de l'exposition externe.

Les équivalents de dose qui auraient été reçus par des populations présentes au moment de la retombée et qui auraient ensuite séjourné au même endroit ont été évalués. Les populations nomades du Kel Torha, les plus exposées (240 personnes évoluant à la frange nord de la retombée) auraient ainsi pu recevoir des équivalents de dose cumulée allant jusqu'à 2,5 mSv (de l'ordre de grandeur d'une année de radioactivité naturelle).

Les conséquences environnementales

Pour la radioactivité atmosphérique, les mesures de la radioactivité des aérosols étaient réalisées dans les postes de mesure permanents implantés à Oasis 2, et à la «Base-vie ». Les résultats des mesures effectuées dans le courant du mois de mai 1962, après l'expérimentation, sont donnés dans le graphique ci-dessous :

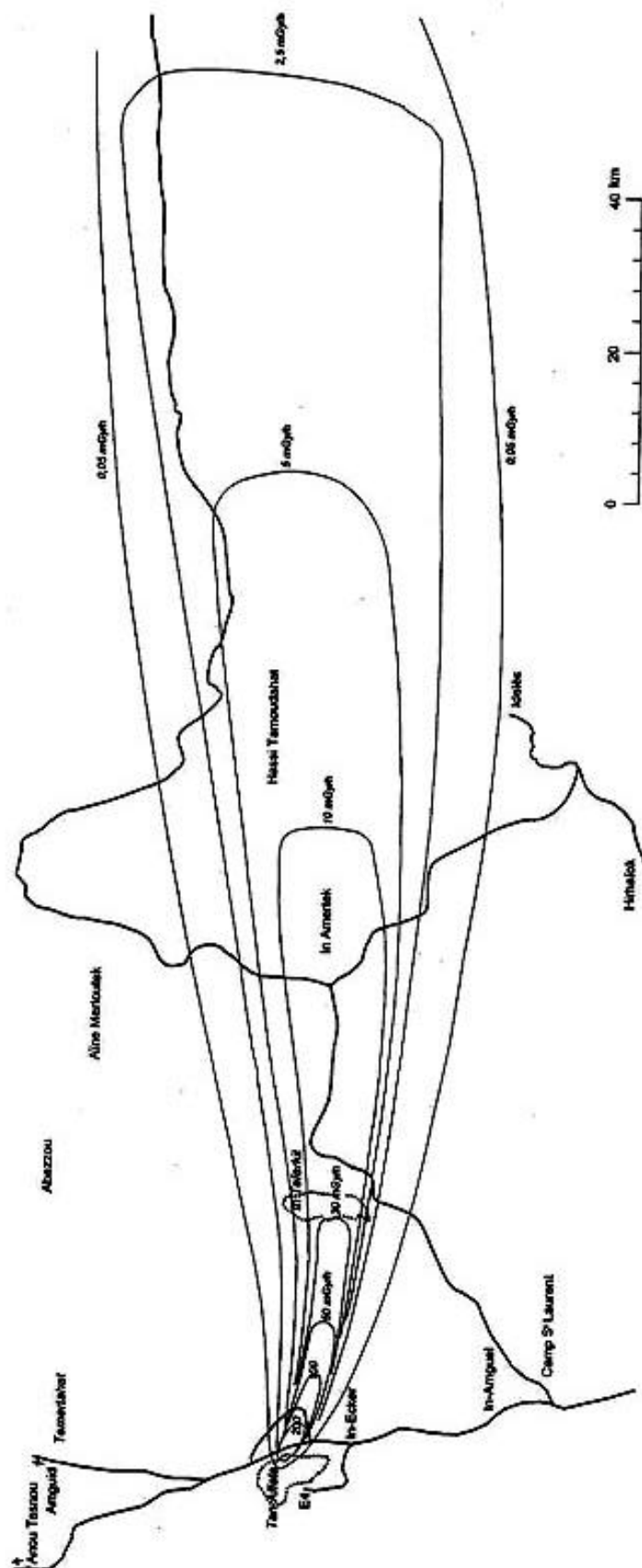


Bq/m³

Radioactivité atmosphérique au cours du mois de mai 1962 (valeurs moyennes).

Toutes les mesures effectuées donnent des valeurs assez élevées correspondant à l'arrivée du nuage, puis ensuite donnent des valeurs nettement inférieures aux concentrations maximales admissibles en permanence pour le public (CMA air 168 h public à J+5 pour un mélange de produits de fission : 75 Bq/m³). On peut considérer que la radioactivité atmosphérique est redevenue normale lorsque la valeur de 0,2 Bq/m³ est atteinte, valeur correspondant approximativement à la radioactivité résiduelle due aux expérimentations étrangères de 1961.

Pour l'eau, les valeurs atteintes ne dépassent pas les concentrations admissibles pour le public (CMA eau de boisson 168 h public à J + 1 pour un mélange de produits de fission : 1500 kBq/m³).



Carte des isodébits de dose à H + 1 lors de l'accident Béryl

5.2. L'essai Améthyste

Lors de cette expérience réalisée le 30 mars 1963, il y a eu sortie d'une faible quantité de scories de roches fondues qui s'est déposée sur le carreau de la galerie. Un panache contenant des aérosols et des produits gazeux, en quantité beaucoup plus faible que dans le cas de Béryl, s'est dirigé vers l'Est Sud-Est.

Les conséquences ont été très faibles sur le plan dosimétrique :

- à Oasis 2 (10 km de la zone d'expérimentation), l'irradiation externe a atteint temporairement 0,2 mGy/h. Les dosimètres de tous les personnels basés à Oasis 2 qui ne sont pas intervenus sur le chantier de l'essai, ont tous été négatifs en mars et avril 1963. Pour ces personnels, l'équivalent de dose externe intégrée sur chacun de ces deux mois a donc été inférieur à 0,4 mSv. Parmi les personnels qui sont intervenus sur le chantier, 13 d'entre eux ont reçu un équivalent de dose engagée de 10 mSv environ.

- Les seules populations sédentaires concernées ont été celles d'Ideles. Dans cette oasis, située à 100 km du polygone d'expérimentations, où vivaient 280 personnes, l'irradiation externe à 1m du sol a atteint, pendant un temps court, 0,1 mGy/h le jour de l'essai : cela correspond à des équivalents de dose inférieurs à 1 mSv.

5.3. Les essais Rubis et Jade

Lors de l'expérience Rubis, le 20 octobre 1963, une sortie de gaz rares et d'iodes s'est produite dans l'heure suivant la réalisation de l'essai, avec formation d'un panache. Celui-ci s'est d'abord dirigé vers le nord, puis il est revenu vers le sud, en direction de Oasis 2 où les retombées, favorisées par des pluies importantes, ont conduit à un débit de dose égal à 0,1 mGy/h. 500 personnes ont été évacuées et contrôlées. La dose reçue par ces personnels a été d'environ 0,2 mSv.

La contamination a été détectée jusqu'à Tamanrasset, à 150 km au sud, mais avec des équivalents de dose engagée négligeables (environ 0,01 mSv).

Dans le cas de l'expérimentation Jade, le 30 mai 1965, il est observé une sortie de gaz rares et d'iode par la galerie. Le débit de dose était de 20 mGy/h à H+4 au niveau du carreau de la galerie. L'impact radiologique sur le personnel était faible (inférieur à 1 mSv).

Expérience	Date (heure locale)	W (kt)	Observations, ordre de grandeur
BERYL	01.05.62 à 10 h	< 30	Expérimentation non totalement confinée, sortie de 5 à 10 % de radioactivité, coulée de laves à l'extérieur (environ 700 m ³). 7 Gy/h et 1,1 10 ¹¹ Bq/m ³ dans le nuage à 7 km. Retombées : 0,1 mGy/h à 150 km à J+1.
AMETHYSTE	30.03.63 à 10 h	< 5	Expérimentation non totalement confinée, portes projetées à l'extérieur, laves dans la galerie. 0,2 Gy/h sur le carreau E3 à H + 20 minutes (mesure à 20 m de hauteur). 20 µGy/h à 32 km à H + 6 heures environ (mesure à 50 m de hauteur).
RUBIS	20.10.63 à 13 h	< 100	Sortie de gaz rares + iodes par la galerie à H + 15 minutes. 1 Gy/h max à H + 1 heure (à 20 m de hauteur) à l'entrée de la galerie E5. 0,1 mGy/h au Poste de Commande de tir et à Oasis II, évacuation d'Oasis II vers la Base Vie.
JADE	30.05.65 à 11 h	< 5	Sortie par forage (10 mGy/h à H + 2 h) et par la galerie. 20 mGy/h à H + 4 h (gaz rares + iodes). Explosion (gaz) en galerie le 13 juin.

Synthèse des essais souterrains non totalement confinés

6. Les expériences complémentaires

Parallèlement aux expérimentations nucléaires, des expériences complémentaires au sol sur la physique des aérosols de plutonium, mettant en jeu de faibles quantités de cet élément, sans dégagement d'énergie nucléaire (sans production de produits de fission ni d'activation), ont lieu sur les deux séries de sites du CSEM et du CEMO. Compte tenu de leur caractère très localisé, ces expériences ne pouvaient avoir et n'ont eu aucun impact sur les populations.

Au CSEM, 35 expériences de propagation de choc sur des pastilles de plutonium ont été réalisées de 1961 à 1963. Au CEMO, 5 expériences sur la physique des aérosols de plutonium ont été réalisées entre 1964 et 1966.

Au cours d'une expérience sur pastille, le 19 avril 1962 au CSEM, une détonation prématurée de l'explosif chimique a eu lieu en fin de préparation de l'expérimentation. Les opérations étaient effectuées par une équipe militaire.

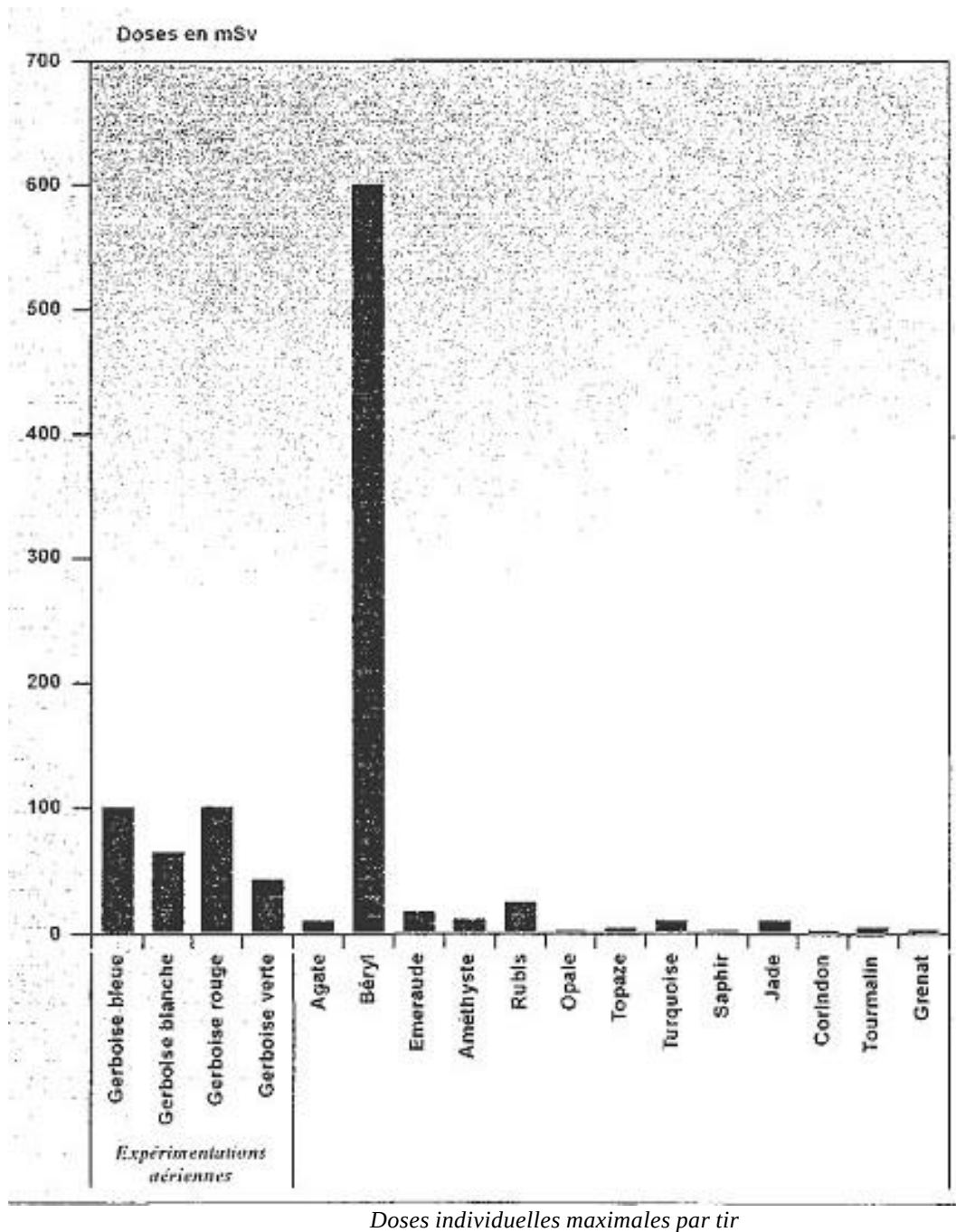
Dix personnes qui se trouvaient dans un rayon de 50 m ont été affectées par l'explosion; on nota un blessé grave présentant des plaies multiples par éclats, des brûlures superficielles et un traumatisme oculaire par blast⁹ entraînant des séquelles fonctionnelles, sept blessés légers présentant des criblages, notamment de la face, des brûlures superficielles ou des ecchymoses.

⁹ Effet de souffle entraîné par l'onde de choc

7. Bilan global

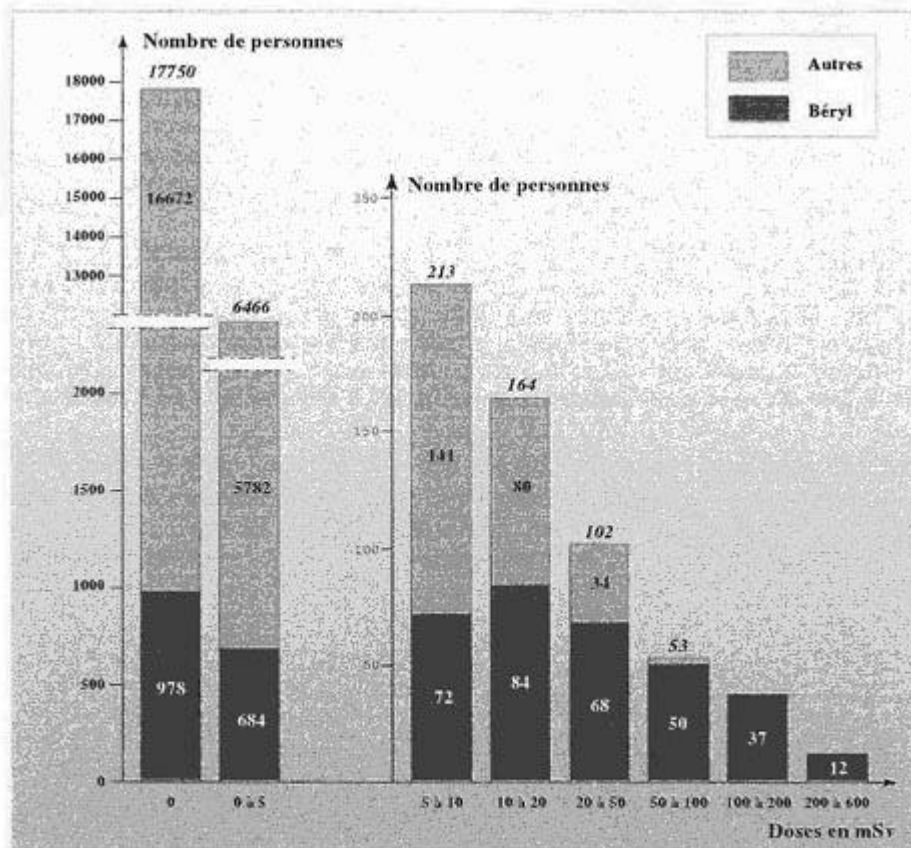
Les doses maximales sont à examiner au regard des limites réglementaires (en particulier la limite fixée à 50 mSv par an pour l'exposition de l'organisme entier des personnels de la 1^{ère} catégorie). Chaque personne ayant pu participer à plusieurs expérimentations, il est important de s'intéresser non seulement au maximum individuel enregistré pour chaque essai, mais aussi à la répartition du personnel par gamme de doses reçues pendant l'ensemble des expérimentations.

L'étude montre que les essais aériens et Béryl sont les événements ayant provoqué les doses les plus importantes : toutes les doses supérieures à 50 mSv sont enregistrées pour les 4 expérimentations aériennes et l'essai souterrain Béryl.



➤ Répartition des effectifs par intervalles de doses

La répartition des personnels par intervalles de dose, pour l'ensemble des expérimentations réalisées au Sahara peut être résumé dans le graphique ci-dessous :



Bilan global de la dosimétrie externe des personnels par intervalles de doses

Ce graphique est établi sur la base des doses cumulées par les personnels durant la totalité de leur séjour. Les doses ont été imputées à Béryl quant la part due à cet essai est prépondérante.

Sur 24 000 personnes, près de 18 000 ont reçu une dose nulle et environ 6 500 une dose comprise entre 0 et 5 mSv. 581 personnes (2,5 %) ont reçu une dose cumulée supérieure à 5 mSv. La quasi-totalité des doses supérieures à 50 mSv sont imputables à l'essai Béryl.

➤ Les populations locales

Concernant les populations, qui se sont toujours trouvées à l'écart des retombées proches, les doses sont restées dans la gamme des conséquences de retombées lointaines soit donc de l'ordre du centième à quelques dixièmes de mSv.

➤ Conformément aux accords d'Evian, les sites du CSEM et du CEMO ont été remis aux autorités algériennes dans le courant de l'année 1967, après qu'il ait été procédé au démontage de l'ensemble des installations techniques, au nettoyage et à l'obturation des galeries.

L'évaluation de la situation radiologique actuelle de ces lieux et des expositions potentielles qu'ils pourraient induire a été engagée par l'AIEA.

II – Les essais nucléaires en Polynésie : la recherche d'une incidence minimale

Quatre ans avant la cessation des essais nucléaires au Sahara la poursuite de ces essais dans un autre site avait été décidée et ce sont plus particulièrement les atolls de Mururoa et de Fangataufa à l'extrémité Est de l'archipel des Tuamotou en Polynésie française qui avaient été désignés à cette fin.

1. La situation géographique et climatique

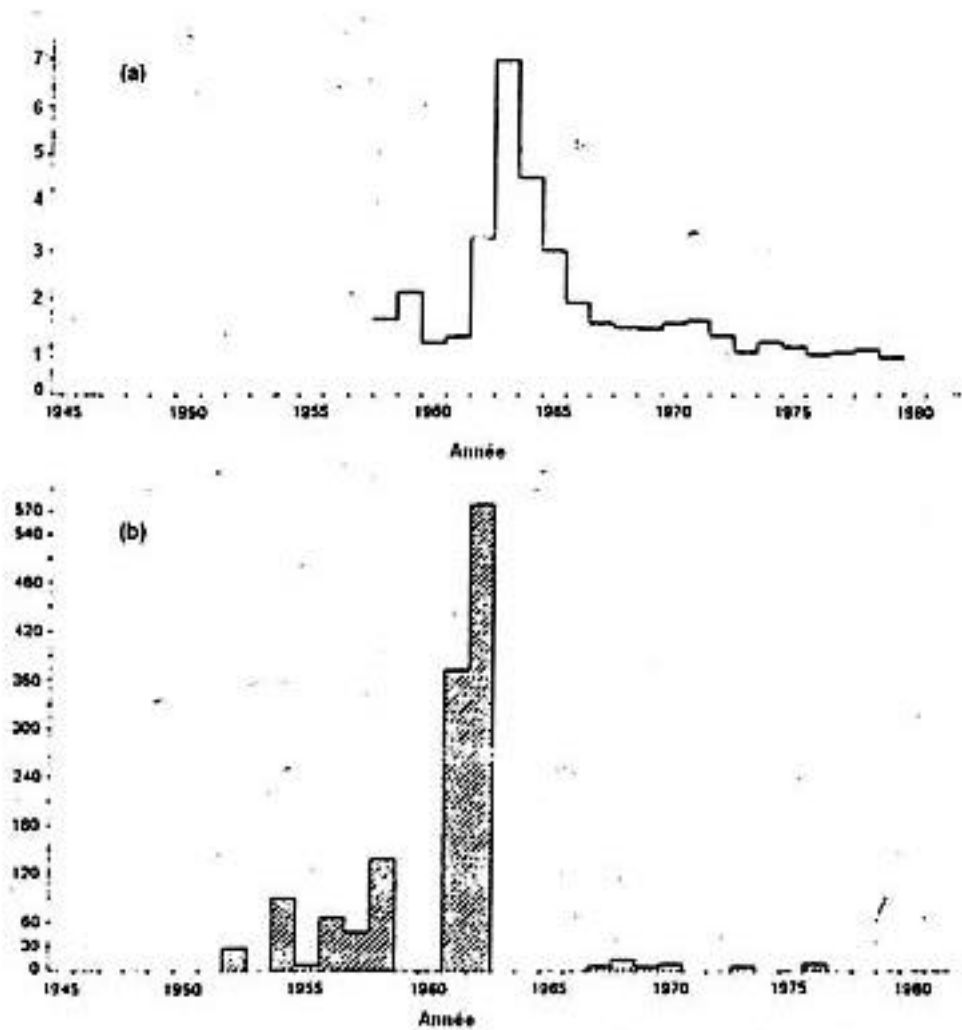
Le choix du site de Mururoa (et Fangataufa) s'est imposé très aisément pour des raisons évidentes d'isolement, d'absence de population proche (moins de 2300 habitants dans un rayon de 500 km et moins de 5000 dans un rayon de 1000 km) et de régime climatique favorable qui minimisait au maximum les risques de retombées sur des régions habitées permettant également une dispersion efficace vers des zones entièrement vides. En effet, pendant l'hiver austral, la zone d'essais se trouve dans une région de vents soufflant en altitude de l'Ouest vers l'Est donc en direction d'une zone désertique de plus de 6000 km.

Il convient de rappeler en outre que ce site du CEP (Centre d'Expérimentation du Pacifique), situé à plus de 1100 km de Tahiti, était à plus de 4750 km d'Auckland en Nouvelle Zélande, 6600 km des côtes californiennes et de Lima, 6900 km de l'Australie.

Les distances des sites d'essais étrangers par rapport à des régions substantiellement peuplées n'avaient rien à voir avec celles du CEP. Aux Etats-Unis, le site du Nevada est à 120 km de Las Vegas et 15 millions d'habitants vivent dans un rayon de 150 km du site. En URSS, Semipalatinsk est à 560 km d'Omsk et Barnaul dans l'Altaï est encore un peu plus proche : on compte 1,2 million d'habitants dans un rayon de 500 km autour du site. En Australie, Maralinga et Emu sont situées à 850 km d'Adélaïde en moyenne (1,2 million d'habitants). Enfin, en Chine la distance Lob Nor-Ouroumtchi est de 500 km, et les localités au Kansu sont à la même distance.

Cet éloignement et cet isolement ont été un facteur essentiel à la limitation des incidences des essais français dans le Pacifique mais ce bénéfice avait un coût évident à la fois en termes financier, d'organisation et de contrainte. Son évaluation, problématique d'ailleurs, n'est pas l'objet du présent rapport, mais l'importance de ce coût ne doit pas être oublié ou minimisé. La sécurité a nécessairement un prix par rapport à des solutions de facilité bien moins lourdes et bien moins onéreuses ; les cas de Mururoa et de Semipalatinsk l'illustrent chacun à leur manière.

La part limitée des essais français dans l'ensemble des essais atmosphériques mais aussi les conditions dans lesquelles ils ont été conduits, avec le respect de grandes exigences au niveau météorologique, montrent d'emblée pourquoi des retombées locales ont été extrêmement limitées lorsqu'il y en a eu et pourquoi leur contribution aux retombées globales reste faible puisque, ainsi que le précisait dès 1982 le rapport de l'UNSCEAR, le niveau de radioactivité artificiel imputable aux retombées des essais n'a fait que décroître depuis 1965.



Source : UNSCEAR 1982

Evolution dans le temps des doses collectives provenant des explosions nucléaires dans l'atmosphère.

- (a) Dose collective annuelle moyenne reçue de 1958 à 1979 (en pourcentage de la dose provenant des sources naturelles)*
- (b) Dose collective engagée pour l'avenir par les tirs effectués entre 1945 et 1980 (en terme de journées d'exposition équivalentes aux sources naturelles)*

Pour l'ensemble du Pacifique, de 1946 à 1962, les Etats-Unis ont procédé à 106 essais atmosphériques et la Grande-Bretagne à 22 de 1952 à 1958 ; la totalité des essais réalisés dans cette zone représente 170 mégatonnes environ, la part française étant estimée à 10,1 mégatonnes pour 41 essais atmosphériques.

2. Les conditions de réalisation des essais atmosphériques ; les différents types de tirs

Seuls seront rappelés ici les quelques éléments factuels ou techniques nécessaires à l'appréciation des incidences sur l'environnement et la santé. L'organisation du CEP, la distribution des fonctions entre les différents acteurs au sein des Armées et du CEA ne sont évoquées que dans la mesure où elles peuvent également avoir une importance dans cette perspective.

2.1. Des tirs atmosphériques

La France avait déjà l'expérience des essais souterrains en galerie. Les premières expériences atmosphériques réalisées à Mururoa et à Fangataufa l'ont été soit à partir d'une barge flottant au milieu de l'atoll, soit, dès que la technique a été maîtrisée, sous ballons captifs, et exceptionnellement d'avions.

La nécessité se faisait jour de passer aux essais d'engins thermonucléaires, donc de passer à des puissances mégatonniques, ce qui impliquait que l'on sorte du domaine des essais souterrains.

2.2. Des tirs regroupés en « campagnes »

Pour éviter que les retombées atteignent des îles habitées, il était impératif que les essais se fassent sous un régime de temps favorable, la surveillance météorologique étant de toute façon constante, rigoureuse et exhaustive.

Aussi, la période où les tirs ont lieu s'étend-elle de mai à septembre. Ce regroupement des tirs en quelques jours pendant les cinq mois de campagne s'observe également et répond, outre les exigences météorologiques, à des besoins d'organisation. Il faut en effet considérer que chaque tir représente, surtout lors des premières campagnes, une organisation importante et lourde avec évacuation du site par une véritable flotte. Une description illustrative et résumée de cette organisation est donnée dans l'ouvrage « Les essais nucléaires français »¹⁰ :

« Chaque tir, surtout ceux d'une certaine énergie, en raison de l'altitude du nuage, et donc de l'altitude à laquelle il faut faire des prélèvements de poussières et de gaz, représente une véritable opération aéronavale : appareillage des bâtiments bases dans la nuit précédant le tir ; surveillance des zones maritimes et aériennes proches du champ de tir ; élaboration des prévisions météorologiques et décision de procéder à l'expérimentation ; montage de l'engin expérimental et évacuation du personnel ayant procédé à ce montage ; activation de l'ensemble des moyens de mesures du champ de tir ; exécution du tir ; déclenchement de l'opération prélèvements, soit par pénétration du nuage par des

¹⁰ Les essais nucléaires français (op. cit. page 20)

avons spécialement équipés, soit par lancement de fusées de prélèvement de poussières de gaz, retombant en mer et qu'il faut ensuite localiser et récupérer par chalutage en hélicoptère avant transfert par avion vers les laboratoires de Hao ; récupération des enregistrements sur le champ de tir ; retour de la « Flotte » à Mururoa en vue de l'expérimentation suivante.

Ces opérations minutieusement préparées par l'état-major du GOEN (Groupement Opérationnel des Expérimentations Nucléaires) se déroulent, dès les premiers tirs, « comme à l'exercice ». Elles exigent, pour les campagnes importantes que sont les campagnes 1966 et 1968 (avec prélèvements par fusée), la mise en œuvre d'une force aéronavale imposante, la Force Alpha, qui comprend un porte-avions, des escorteurs d'escadre, des avisos escorteurs, des avions anti-sous-marins et un soutien logistique important. »

2.3. En premier lieu, les tirs sur barge

En un an, du 2 juillet 1966 (premier tir du CEP) au 2 juillet 1967 ont eu lieu quatre tirs sur barge. La barge est positionnée avec précision devant le blockhaus du poste d'enregistrement avancé (PEA). Cette barge qui comprend une grande partie de l'instrumentation (enregistrement et contrôle) était naturellement détruite à chaque essai. Ce type de tir entraînait une contamination locale substantielle qui gênait ensuite la reprise des activités sur l'atoll. Ce sont de beaucoup ces tirs sur barge qui ont entraîné la plus importante contamination. Le directeur des services de protection radiologique du CEA reconnaissait d'ailleurs : *« si nous n'avions pas effectué de tirs sous barge, nous aurions aujourd'hui des lagons impeccables »*¹¹.

2.4. En second lieu, les tirs sous ballon

Une première expérience sous ballon captif eut lieu le 11 septembre 1966 mais ce n'est qu'au milieu de 1968 que l'on put mettre un terme aux tirs sur barge dont le caractère contaminant au plan local était notoire à plusieurs titres. En effet, lorsque le tir est effectué sur barge donc au niveau de la mer, la boule de feu créée par l'explosion peut atteindre plusieurs centaines de mètres de rayon pour les engins les plus puissants et se heurte aux matériaux et à l'eau du lagon qui sont alors vaporisés et mélangés aux gaz chauds.

Ce délai s'explique par le fait que cette technique était difficile à maîtriser : *« il faut que la charge utile du ballon soit suffisante pour que la nacelle puisse emporter l'engin à expérimenter et l'instrumentation des mesures proches. Il faut aussi que, malgré des vents souvent très forts, la stabilité de la nacelle soit parfaite de manière à ce que les différents appareillages de mesures installés au sol restent bien pointés sur elle au moment du tir. On est donc amené à mettre en*

¹¹ « Tahiti pacifique » - Août 1995

œuvre les techniques des aéroliers un peu oubliées et à faire de nombreux essais en métropole »¹².

On doit penser en outre que l'altitude au ballon pouvait varier de 200 à 800 mètres.

La technique étant maîtrisée, les résultats ont largement atteint les objectifs : l'explosion s'est faite à une hauteur suffisante, supérieure au rayon de la boule de feu, sans interaction donc avec le sol ou l'eau, limitant ainsi très fortement les retombées radioactives. Ce progrès décisif a été remarqué, ainsi dans l'ouvrage SCOPE/59 « Nuclear Test Explosions » de Sir Frederick Warner, René J.C. Kirchmann (page 60) : *« L'énergie de fission cumulée des essais français peut être estimée à 6500 kt, un peu moins que 3 % du total mondial. Cela représente, si l'on suppose que tous les produits de fission sont reportés d'une manière égale au niveau planétaire, une irradiation équivalente à onze jours de radioactivité naturelle. Les faibles valeurs troposphériques (en relation avec les valeurs stratosphériques) sont le résultat positif de la technique de tir appelée « sous ballon ».*

Lorsque la contamination locale est pratiquement nulle, on peut engager les opérations de rééquipement de la zone de tir immédiatement après l'essai précédent et surtout le besoin d'une évacuation à bord d'une flotte, avec poste de commandement sur un bâtiment de la Marine, disparaît.

Après les essais confirmés de 1967 et de juillet –début août 1968, la première bombe thermonucléaire (tir « Canopus » eut lieu dans ces conditions, à Fangataufa, le 26 août 1968 (2,6 Mt) à une altitude d'un peu plus de 500 mètres ce qui, selon le Professeur Yves Rocard *« pour une bombe thermonucléaire qui dépasse la mégatonne, était à peu près correct pour tirer des bombes aussi propres que possible »¹³.*

2.5. Par ailleurs, des essais spécifiques : tirs par avion et essais de sécurité

➤ Les tirs par avion

Trois essais nucléaires ont été réalisés en 1966, 1973 et 1974 par tir à partir d'avions dans des zones éloignées de Mururoa, respectivement à 85, 26 et 17 kilomètres. Ce type d'essai, bien davantage pratiqué par les Américains et les Soviétiques, et dans une moindre mesure par les Britanniques et les Chinois, a l'avantage de reproduire exactement les conditions réelles d'utilisation des armes nucléaires mais ne permet peut-être pas une observation et une mesure aussi détaillées de l'explosion de l'engin lui-même.

¹² « Les essais nucléaires français » (op. cit. page 20)

¹³ Mémoires sans concessions – Yves Rocard – p. 265

➤ Les essais de sécurité

A côté des essais de tir de l'engin nucléaire, la France a pratiqué, comme les autres puissances ayant développé un armement nucléaire opérationnel, des essais destinés à s'assurer que l'engin proprement dit ne s'amorce pas de lui-même pendant le transport ou le stockage et que, dans tous les cas d'accidents possibles, il ne puisse y avoir de dégagement d'énergie nucléaire, même si cet accident entraîne l'amorçage de l'explosif classique de la charge nucléaire. On peut admettre tout au plus une certaine dispersion de matières fissiles.

L'objectif technologique ultime est la sûreté intrinsèque de l'engin lui-même, au-delà des dispositifs de séparation physique de l'explosif classique et de la partie nucléaire. La charge est dite alors « autosûre ».

L'atteinte de cet objectif implique donc la réalisation d'expérimentations répétées qui sont polluantes. Entre 1966 et 1974, cinq essais de sécurité ont été effectués à Mururoa. Ces essais ont été réalisés au sol en zone « Colette ». La dispersion de plutonium a été importante et la zone a dû dans un premier temps être recouverte de bitume pour immobiliser le plutonium déposé. Dans un deuxième temps, au milieu des années 80, une importante opération de décontamination a été réalisée dans ce secteur.

Sept autres essais de ce type l'ont été en souterrain après 1974 jusqu'en 1989. Les chiffres sur ce point varient quelque peu selon les sources, notamment semble-t-il, selon qu'il y ait eu ou non très léger dégagement d'énergie nucléaire. L'AIEA donne, quant à elle, le chiffre de 10 essais de sécurité souterrains dont trois avec dégagement. Le même genre d'incertitude, avec des marges plus élevées, s'observe aux Etats-Unis sans parler de l'URSS.

3. La sécurité des essais atmosphériques

Après le choix du site d'expérimentation qui s'est révélé être un des sinon le mieux adapté par rapport à tous les autres sites d'essais atmosphériques, et l'utilisation d'une technique de tir peu contaminante, l'organisation qui vise à assurer la sécurité maximale donc une incidence minimale sur l'environnement et la santé, a été fixée comme objectif aux différents acteurs, Armées et CEA. Au-delà de ce qui a déjà été évoqué, les lignes de force de cette organisation sont :

- la priorité donnée à la « sécurité météorologique » par rapport aux exigences techniques et militaires, et
- la vigilance sanitaire par la surveillance des hommes et du milieu naturel.

Ici encore, on se contentera de rappeler les éléments essentiels de dispositifs qui ont déjà été largement présentés à différentes occasions.

3.1. La « sécurité météorologique »

L'objectif de la plus grande sécurité possible vis-à-vis des risques météorologiques a impliqué la mise en place d'un réseau étendu de stations météorologiques. En effet, la zone du Pacifique sud présentant l'avantage d'être presque vide d'îles peuplées, la densité de points d'observation était évidemment en rapport. Il a ainsi été nécessaire d'ajouter au réseau existant des stations complémentaires fixes (insulares) mais aussi mobiles sur les bâtiments de la Marine nationale dont certains étaient chargés spécialement de cette tâche (avec l'observation des retombées) : les « piquets météo » en place pendant tout la saison d'essais.

Les moyens aériens d'analyse ont été aussi largement utilisés, de même que les satellites météorologiques.

La procédure et les critères de sécurité pour le tir répondaient à une stratégie précise ainsi caractérisée dans l'ouvrage déjà cité¹⁴ :

« - aucune retombée directe prévisible sur une zone habitée y compris en cas de pluie, pouvant entraîner une radioexposition supérieure à celle due à la radioactivité naturelle ;

- toute retombée imprévisible sur un atoll ou une île habitée ne doit pas dépasser la limite annuelle recommandée par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) pour les populations ;

- tout dépassement de cette valeur ne peut se rencontrer que dans les zones déclarées dangereuses (qui couvrent aussi le risque d'éblouissement) ;

- aucune couche nuageuse ne doit risquer, en traversant une route aérienne commerciale, de contaminer un avion au-dessus des niveaux recommandés par la CIPR ;

- sur le site de tir, on doit respecter les mêmes normes de protection contre les rayonnements que dans le cas d'une centrale nucléaire et de son voisinage.

La maîtrise des techniques de prévision météorologique et radiobiologique était telle qu'elle autorisait la présence de tous les expérimentateurs sur la base vie du site de tirs, ce qui libérait le dispositif opérationnel de la lourdeur d'une évacuation préalable et permettait de saisir,

¹⁴ « Les essais nucléaires français » (op. cit. page 20)

dans les meilleures conditions de fiabilité, une situation météorologique favorable ».

Cette connaissance météorologique doit avoir son prolongement dans l'application au tir lui-même et à ses effets immédiats et à moyen terme. Les mêmes auteurs¹⁵ précisent ainsi ce qu'ils appellent « une bonne connaissance de la source, de bons modèles de calcul du transfert des particules et des retombées locales. Un modèle très fiable dans toute la gamme des énergies a été établi : dimensions géométriques, composition du nuage, distribution granulométrique des particules, répartition de la radioactivité.

Un bon modèle de calcul des retombées locales, essentiellement problème de balistique et de cinématique, a été mis au point. Ceci permet d'établir des cartes de retombées à partir de données météorologiques présentant des courbes isochrones donnant l'heure de l'arrivée de la retombée et des courbes isointensités donnant le niveau de la retombée.

Les services français, à partir des études théoriques et expérimentales menées en Polynésie, ont acquis une grande maîtrise pour la prévision des retombées immédiates et différées. Pour cela, ils disposaient d'un excellent modèle de calcul de transfert des particules légères à toute distance. Il était en effet nécessaire pour parer au risque d'accroissement des retombées locales par précipitation au sol par la pluie, pour assurer la sécurité des vols long courrier, pour éviter l'atteinte des territoires voisins, en particulier des pays andins».

Cette « sécurité météo » avait un coût financier bien sûr, mais avant tout sous forme d'attente et éventuellement de décalage des opérations et de toutes les activités des différents intervenants. Ainsi, 18 tirs ont été repoussés pour cause de météorologie défavorable dont :

- **8 tirs entraînant des retards de un à deux jours,**
- **10 tirs entraînant des retards de 3 à 17 jours.**

La somme de l'ensemble de ces retards représente un cumul d'environ cent jours d'attente.

L'objectif de sécurité a ainsi déterminé une organisation et un état d'esprit qui ont sans doute contribué à éviter non seulement des événements comme celui du tir Bravo à Bikini ou ceux liés à certains tirs à Semipalatinsk ou encore ceux des retombées de certains tirs du Nevada (« Simon » en 1953 et « Plumbbob » de mai à octobre 1957).

¹⁵ « Les essais nucléaires français » (op. cit. page 20)

3.2. La vigilance environnementale et sanitaire

La même orientation et une méthode analogue ont prévalu pour la vigilance environnementale et sanitaire. Il faut dire aussi que la pression hostile aux essais français de pays de la zone géographique, au sens étendu du terme (Nouvelle Zélande, Australie, Pérou) était telle que les instructions des autorités civiles et militaires ont, dès le départ, exigé un souci de sécurité que l'on pourrait qualifier d'exhaustif.

Dès 1962, le CEA, à travers son Département de protection, avait installé à Faaa (Tahiti) une station de prélèvements de produits alimentaires pour surveiller les niveaux de radioactivité artificielle qui pouvaient avoir leur origine dans les essais nucléaires étrangers. L'évolution des dépôts de strontium 90 dans l'hémisphère Sud illustre d'ailleurs ce phénomène : le maximum a été atteint en 1964 avec $1,55 \cdot 10^{16}$ Bq, le niveau est redescendu à 0,4 en 1968, puis remonté à 0,55 en 1971 et s'est stabilisé à moins de 0,15 à partir de 1974.

- Après la décision de créer le centre d'expérimentations du Pacifique, deux services mixtes (Armées-CEA) avaient été institués :

- le service mixte de sécurité radiologique pour assurer la radioprotection du personnel et la surveillance de l'environnement physique (eau, air, sol) par un réseau de mesures de l'irradiation ambiante et par les mesures effectuées sur les prélèvements périodiques.

- le service mixte de contrôle biologique pour la surveillance radiobiologique de l'environnement (faune et flore).

En outre, un laboratoire « civil », créé au sein du CEA, intervenait pour effectuer les analyses et mesures sur les échantillons prélevés par le précédent : le laboratoire de surveillance radiologique, devenu ensuite (en 1979) le laboratoire d'étude de surveillance de l'environnement, il a enfin été intégré à l'IPSN en devenant l'échelon polynésien. Ce laboratoire fonctionne toujours ; il a pour mission de surveiller le niveau de radioactivité dans l'environnement en Polynésie.

Cette organisation, quelque peu complexe, a néanmoins permis de suivre précisément l'évaluation des situations pendant la totalité des essais atmosphériques puis souterrains. L'UNSCEAR a ainsi pu disposer de séries de données standardisées et suivies sur de très longues périodes de même que tous les organismes étrangers, notamment scientifiques avec lesquels des contacts ont eu lieu et ce, sur plus de trente ans.

- La vigilance sanitaire au niveau des personnels a été assurée dans les conditions qui imposaient la législation générale et les réglementations spécifiques propres par exemple aux établissements du CEA, pour ce qui concerne notamment la protection contre les radiations ionisantes. Dans les deux atolls le

niveau de surveillance a été le même que celui prévu pour les autres installations nucléaires françaises.

En outre, la législation propre à la Polynésie a naturellement été appliquée. Ce suivi médical concernait tous les travailleurs civils, c'est-à-dire non seulement les agents du CEA mais aussi les salariés des entreprises extérieures dès lors qu'ils travaillaient sur l'un des sites d'expérimentation.

Les résultats du suivi médical assuré par le CEA ont fait l'objet d'une enquête sanitaire qui a porté sur près de 6700 personnes ; cet effectif représente 3% de la population polynésienne de l'époque. Il n'en est ressorti aucun risque radiologique spécifique.

Par ailleurs, les pratiques de suivi dosimétrique individuel ont été appliquées pour l'ensemble des personnels civils et militaires (cf. infra).

III - L'expertise des incidences environnementales en Polynésie : les essais atmosphériques

1. Le point le plus ausculté de la planète

Le site d'essais au CEP que constituaient les atolls de Mururoa et Fangataufa a fait l'objet, dès le début, de suivi et de surveillance de la part des expérimentateurs eux-mêmes d'une part, d'états et d'institutions étrangères d'autre part, et logiquement d'organes internationaux spécialisés (UNSCEAR, AIEA) ou non (Commission du Pacifique Sud). On a noté qu'à l'origine les laboratoires et mécanismes d'observations français avaient été mis en place et de leur côté des universités, des centres de recherche en Nouvelle-Zélande, Australie ou ailleurs suivaient soigneusement, y compris à la limite des eaux territoriales, les expérimentations. A cela s'ajoutait, comme il est naturel dans ce domaine, des actions dont les résultats n'étaient pas nécessairement destinés à être publiés : « avions américains venant de Pago-Pago pour effectuer des prélèvements dans le nuage, bâtiment anglais basé à Pitcairn pendant toute la campagne, cargo soviétique « de passage »... Pour les Américains, en dehors de l'aspect « renseignement », cela représentant aussi un entraînement à l'exécution et à l'exploitation de prélèvements aériens alors qu'ils n'utilisaient plus ce mode de tir, mais que le traité de Moscou de 1963 prévoyait la possibilité d'une reprise des essais aériens avec un préavis de trois mois¹⁶. ».

On se gardera d'oublier les bâtiments et flottilles d'organisations hostiles aux essais nucléaires français.

¹⁶ « Les essais nucléaires français » op. cit. page 20

Aussi peut-on affirmer, sans aucune exagération, que Mururoa et Fangataufa ont constitué de 1966 à 1998 le point le plus et sans doute aussi le mieux ausculté de la planète¹⁷.

Toutes les disciplines scientifiques, toutes les techniques de recherches et d'analyse ont été mises en œuvre aux différents moments et ce, qu'il s'agisse des essais atmosphériques comme des essais souterrains. Non seulement cela n'est pas critiquable mais encore est tout à fait positif, y compris pour la méthodologie ainsi élaborée qui pourrait être au moins aussi utilement appliquée à d'autres sites d'essais nucléaires atmosphériques et souterrains.

Saisi de l'étude *des «incidences environnementales et sanitaires des essais français»* on se doit donc de rappeler à nouveau les résultats de ces différents travaux et observations, même si certains sont déjà anciens puisque la fin des «atmosphériques» remonte au mois de septembre 1974. Les essais souterrains quant à eux, seront ensuite abordés, ayant été complétés récemment par des études essentielles que sont celles de la Commission géomécanique internationale présidée par le Professeur Charles Fairhurst et bien sûr celle du Comité consultatif international de l'AIEA en 1998.

2. La liste et les caractéristiques des essais dans l'atmosphère de 1966 et 1974

Avant d'aborder ces différents développements, il convient de rappeler l'information de base que constitue la liste des essais atmosphériques et ce dans la version la plus parlante, celle donnée en annexe du rapport de l'AIEA même si elle peut être occasionnellement complétée en ce qui concerne la puissance ou la hauteur des éléments du nuage par le rapport de l'UNSCEAR de 2000.

¹⁷ Le rapport Atkinson (cf. infra) précise lui-même en 1983, c'est-à-dire bien avant que d'autres recherches et enquêtes scientifiques soient réalisées : «*Mururoa a été étudié de façon plus approfondie que tout autre atoll de corail dans le monde. Les travaux géoscientifiques ont été très minutieux et menés avec une haute compétence* » (version française page 89)

ESSAIS NUCLEAIRES FRANÇAIS A MURUROA ET A FANGATAUFA

ESSAIS NUCLEAIRES ET EXPERIENCES DE SECURITE EFFECTUES DANS L'ATMOSPHERE
PAR LA FRANCE A MURUROA ET A FANGATAUFA

Date	Nom	Type	Hauteur (m)	Energie (kt)	
				Fission	Totale
2 juillet 1966	Aldébaran	Barge	0	28	28
19 juillet 1966	Tamouré	Largage	1 000	50	50
21 juillet 1966	Ganymède	Expérience de sécurité	12	0	0
11 septembre 1966	Bételgeuse	Ballon	470	110	110
24 septembre 1966	Rigel ^a	Barge	3	125	125
4 octobre 1966	Sirius	Barge	10	205	205
5 juin 1967	Altaïr	Ballon	295	15	15
27 juin 1967	Antarès	Ballon	340	120	120
2 juillet 1967	Arcturus	Barge	0	22	22
7 juillet 1968	Capella	Ballon	463	115	115
15 juillet 1968	Castor	Ballon	650	450	450
3 août 1968	Pollux	Ballon	490	150	150
24 août 1968	Canopus ^a	Ballon	520	— ^b	2 600
8 septembre 1968	Procyon	Ballon	700	—	1 280
15 mai 1970	Andromède	Ballon	220	13	13
22 mai 1970	Cassiopee	Ballon	500	—	224
30 mai 1970	Dragon ^a	Ballon	500	—	945
24 juin 1970	Eridan	Ballon	220	12	12
3 juillet 1970	Licorne	Ballon	500	—	914
27 juillet 1970	Pégase	Ballon	220	0,05	0,05
2 août 1970	Orion ^a	Ballon	400	—	72
6 août 1970	Toucan	Ballon	500	—	594
5 juin 1971	Dioné	Ballon	275	34	34
12 juin 1971	Encelade	Ballon	450	—	440
4 juillet 1971	Japet	Ballon	230	9	9
8 août 1971	Phobé	Ballon	230	4	4
14 août 1971	Rhée	Ballon	480	—	955
25 juin 1972	Umbriel	Ballon	230	0,5	0,5
30 juin 1972	Titania	Ballon	220	4	4
27 juillet 1972	Obéron	Ballon	220	6	6
31 juillet 1972	Ariel	Expérience de sécurité	10	0,001	0,001
21 juillet 1973	Euterpe	Ballon	220	11	11
28 juillet 1973	Melpomène	Ballon	270	0,05	0,05
18 août 1973	Pallas	Ballon	270	4	4
24 août 1973	Parthénope	Ballon	220	0,2	0,2
29 août 1973	Tamara	Largage	—	6	6
13 septembre 1973	Vesta	Expérience de sécurité	4	0	0
16 juin 1974	Capricorne	Ballon	220	4	4
1 ^{er} juillet 1974	Bélier	Expérience de sécurité	5,6	0	0
7 juillet 1974	Gémeaux	Ballon	312	—	150
17 juillet 1974	Centaure	Ballon	270	4	4
25 juillet 1974	Maquis	Largage	250	8	8
28 juillet 1974	Persée	Expérience de sécurité	5,6	0,001	0,001
14 août 1974	Scorpion	Ballon	312	—	96
24 août 1974	Taureau	Ballon	270	14	14
14 septembre 1974	Verseau	Ballon	433	—	332

a Ces quatre essais ont été réalisés à Fangataufa; tous les autres l'ont été à Mururoa.

b Un tiret indique que les données n'ont pas été communiquées.

3. Les incidences relevées par les autorités françaises et l'UNSCEAR

Les conséquences radiologiques des essais aériens à travers les retombées sont l'élément essentiel qui suscitent, à juste titre, les inquiétudes. Les nombreuses informations communiquées à l'époque ont été parfois précisées et en tout cas mises en perspectives dans différents documents publiés ou communiqués à des institutions étrangères internationales.

Une présentation simplifiée a été réalisée en 1997 par le Ministère de la Défense (DSCEN) et le CEA (DAM/DRIF/DASE) dont les extraits ci-après constituent un rappel nécessaire.

3.1. Le principe et l'analyse des retombées

« Le comportement des retombées constituait un élément essentiel de la sécurité radiologique de ces essais. De nombreuses études ont permis, au cours des années, de développer des modèles de prévision des retombées de plus en plus fiables permettant de prévoir leurs localisations dans l'espace et le temps, leurs intensités et leurs conséquences radiologiques. Avant chaque essai, les simulations réalisées en fonction des prévisions météorologiques et du fonctionnement attendu de l'engin, constituaient les éléments déterminant de la décision de tir. Après le tir, des simulations utilisant les données réelles relatives à la source et les météo actualisées permettaient un suivi de l'évolution du nuage et des prévisions de retombées pour éventuellement être à même de prendre des mesures de protection (mise sous abri des populations, détournement des bateaux ou des avions, etc, ...).

Dispositif de prévision et de contrôle des retombées au CEP

Les différentes mesures réalisées durant les campagnes d'essais aériens ont montré que l'essentiel de la radioactivité se trouve au niveau de la tête du nuage. La hauteur du nuage, et par conséquent, le compartiment atmosphérique dans lequel est injectée la radioactivité dépend de l'énergie de l'essai. La tête du nuage pénètre la stratosphère quand l'énergie dépasse 20 kilotonnes et devient entièrement stratosphérique au-dessus de 150 kilotonnes. Ainsi, pour les essais aériens réalisés au CEP, environ 65% des têtes des nuages, comportant environ 90% de l'énergie libérée, ont été entièrement stratosphériques. Seuls quelques essais de faible énergie (quelques kilotonnes) ont concerné les basses couches de la troposphère.

La circulation générale conduisait donc à diriger l'essentiel de la radioactivité vers l'Est, tandis que les particules les plus lourdes situées au niveau du pied étaient soumises aux vents de secteur Est.

Certaines situations météorologiques évolutives (pour les premières campagnes, une douzaine d'heures séparaient la dernière situation

météorologique complète de l'heure du tir) ont pu compliquer les contours de retombées ou dégrader la fiabilité des prévisions. Les cas les plus caractéristiques ont été le découpage du nuage principal en tranches, les retours anticycloniques et les précipitations.

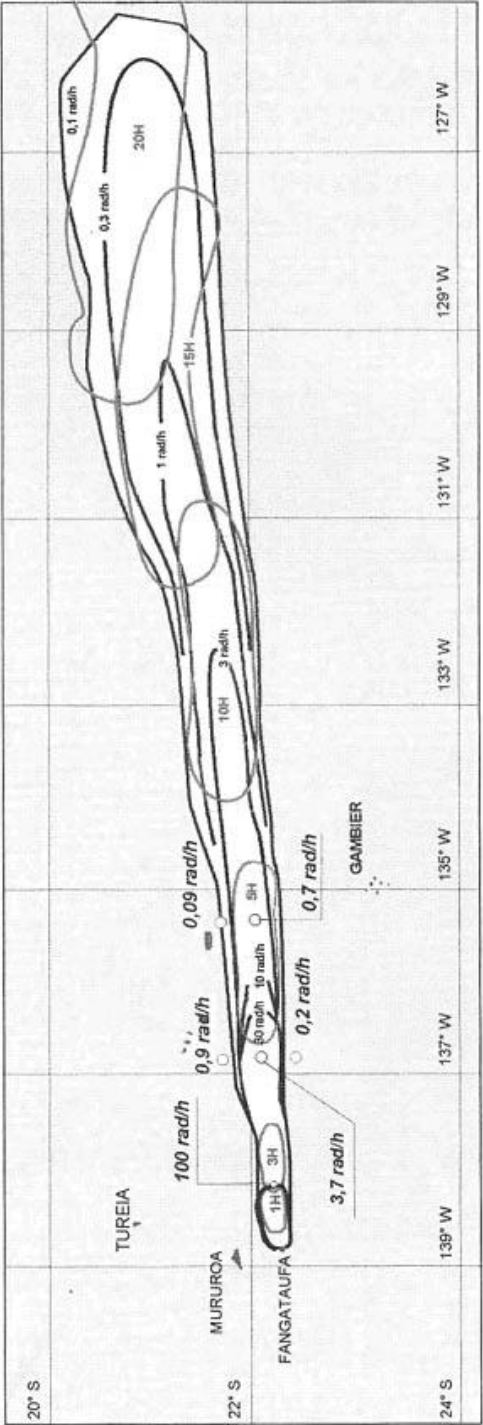
- Pour des essais de faible énergie pour lesquels les nuages étaient entièrement troposphériques, il est arrivé que le nuage soit découpé en plusieurs tranches par des vents de directions différentes suivant l'altitude. Les nuages secondaires ainsi formés évoluaient ensuite sur des trajectoires distinctes.

- Dans certaines conditions météorologiques, des éléments troposphériques du nuage principal pouvaient quitter celui-ci vers le nord dirigé par l'anticyclone froid de Kermadec, et former un ou plusieurs nuages secondaires repris ensuite vers l'ouest par les alizés. Ce phénomène donnait lieu à des retours d'une fraction de nuage appelés "retours anticycloniques" sur le nord et l'ouest de la Polynésie.

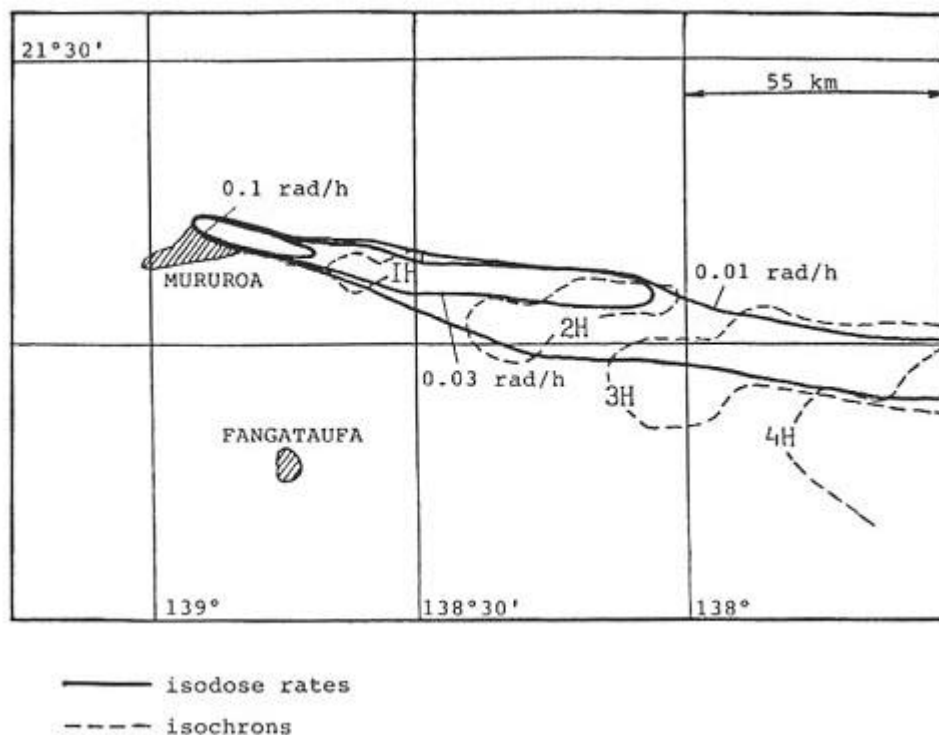
- Les précipitations qui intéressent la moitié basse de la troposphère, ont pour effet de lessiver le nuage et de rabattre au sol la radioactivité. Ces précipitations entraînent l'existence de points chauds c'est à dire une concentration de la radioactivité dans des zones restreintes et corrélativement l'appauvrissement du nuage et une diminution des retombées ultérieures. »

Un exemple de reconstitution des retombées est donné pour le tir Rigel à Fangataufa du 24 septembre 1966, tir sur barge donc localement contaminant mais qui par ailleurs n'a pas donné lieu à des retombées sur des secteurs habités.

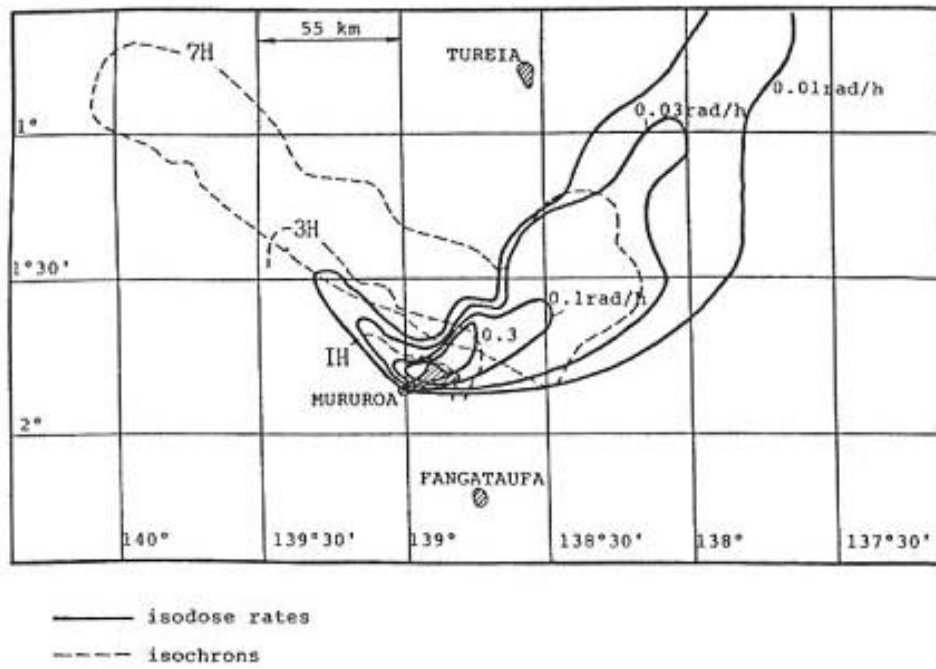
RETOMBÉES PROCHES DE L'ESSAI SUR BARGE RIGEL (24/9/66)



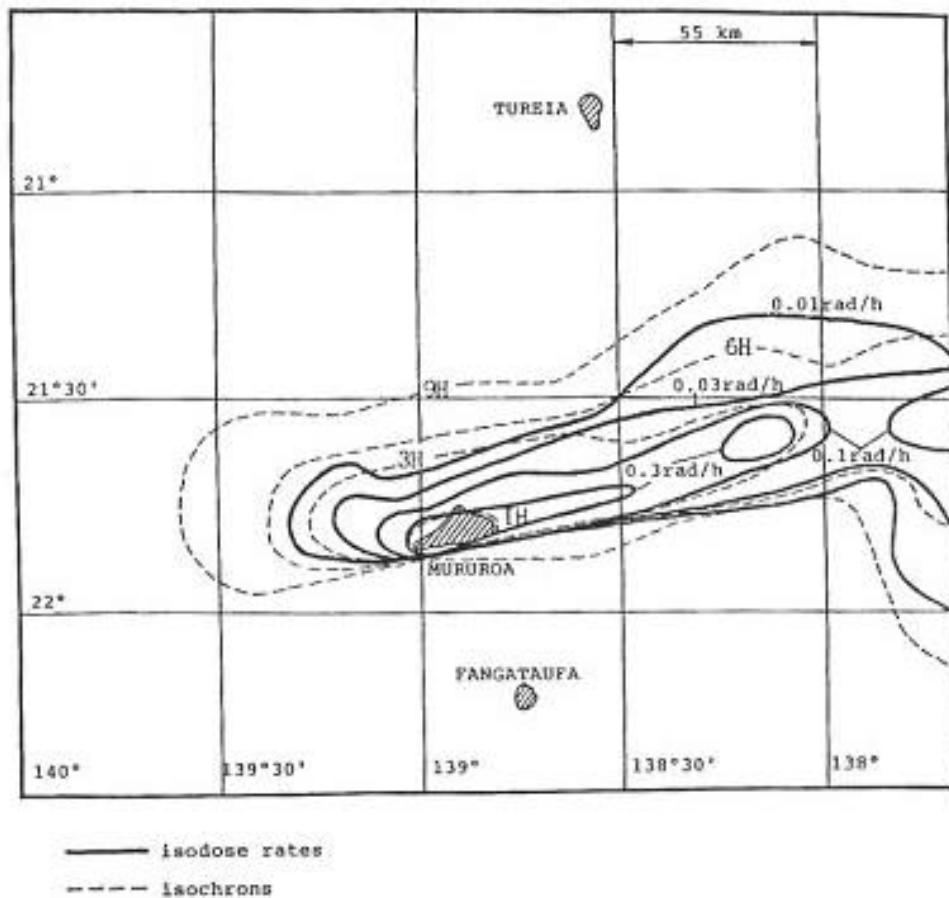
Trois autres exemples de retombées sont fournis par des tirs sous ballon beaucoup moins contaminants mais dont l'un a entraîné des retombées sur Tureia (Encelade le 11 juin 1971); ces trois tirs présentés dans « Nuclear Test Explosions » (Scope/59 op. cit. p. 61-64) sont d'ailleurs très différents en puissance (34, 440 et 995 kt).



Isodoses et isochrones des retombées locales d'un tir de 34 kt sous ballon à 275 m d'altitude (Dione, le 5 juin 1971 à Mururoa)



Isodose et isochrones des retombées locales d'un tir de 440 kt sous ballon à 450 m d'altitude (Encelade, le 12 juin 1971)



*Isodoses et isochrones des retombées locales d'un tir de 955 kt
sous ballon à 480 m d'altitude (Rhea, le 14 août 1971)*

3.2. Les retombées sur les secteurs habités

Comme pour les essais au Sahara et d'une manière générale pour l'analyse des tirs sur des sites d'essais dont les paramètres essentiels ont été communiqués (Bikini, Nevada, Maralinga), on s'attache naturellement davantage aux « événements » auxquels les essais ont pu donner lieu, cela allant de l'accident à l'incident le plus limité, même si de très nombreux tirs n'ont pas posé de problèmes.

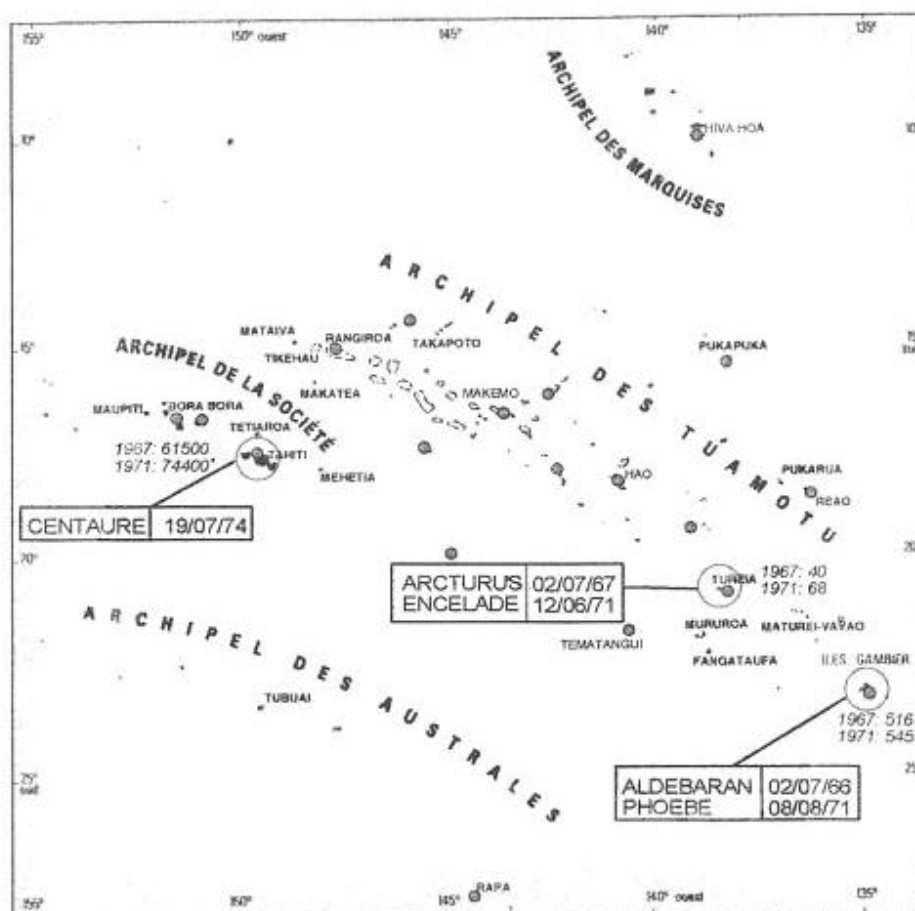
En Polynésie, la décision de tir était conditionnée par la démonstration de l'insignifiance de l'impact sanitaire sur les îles habitées. Les retombées concernaient des zones maritimes désertes et les équivalents de dose induits aux populations par chaque essai ont été négligeables pour la grande majorité des tirs.

➤ D'après le document précité (Ministère de la Défense/CEA 1997),
« cinq essais ont toutefois donné lieu à des retombées un peu plus significatives

sur des lieux habités. Il s'agit des îles Gambier en 1966 et 1971, de l'atoll de Tureia en 1967 et 1971 et de Tahiti en 1974 (figure ci-après).

RESEAU DE SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITE DURANT LES CAMPAGNES D'ESSAIS AERIENS

LOCALISATION DES RETOMBÉES SUR LES ILES HABITEES DE LA POLYNESIE FRANCAISE



● Poste de contrôle ou de surveillance radiologique "à terre"

○ Ile atteinte par une retombée

En italique: année et population

Retombées sur les îles Gambier

Les îles Gambier ont été touchées par des retombées consécutives aux essais ALDEBARAN (1966) et PHOEBE (1971). Le tableau ci-après résume les principales mesures physiques effectuées par le Poste de Contrôle Radiologique des Gambier.

Caractéristiques des retombées sur les îles GAMBIE

EXPERIMENTATION	DUREE	NATURE	DEBIT DE DOSE MAX*	DEBIT DE DOSE FIN RETOMBEE	DEPOT AU SOL (β ,?)
ALDEBARAN 02/07/66 -15h34 TU Mururoa	1h20 H+10h45àH+12h05	Particules Pluies	250 μ Gy/h	130 μ Gy/h (H+12h05)	6 10^7 Bq/m ² (H+12h05)
PHOEBE 08/08/71-18h30TU Mururoa	5h00 H+6h10àH+6h40 H+8h00 àH+12h30	Pluies	55 μ Gy/h (H+6h30)	32 μ Gy/h (H+6h40)	1,110 ⁶ Bq/m ² (H+26h)

* passage du nuage

Pour ALDEBARAN (28kt), premier essai sur barge, les îles Gambier ont été atteintes par des éléments du pied du nuage poussés par des vents de secteur Ouest-Sud-Ouest évoluant au Nord-Ouest dans les heures qui ont précédé l'essai. L'intensité de la retombée est liée au mode de réalisation de cet essai où la fraction de l'activité totale contenue dans le pied est plus importante que pour un essai sous ballon.

De fortes pluies sont intervenues le 03/07/66 et ont entraîné un lessivage du sol. Le débit de dose était de 55 μ Gy/h à H+21 h30.

Après l'expérimentation de faible énergie PHOEBE (3,7 kt), l'évolution météorologique a conduit à placer la population des Gambier sous abri de prévoyance de H+4h30 à H+21h30.

Retombées sur Tureia

L'atoll de Tureia a été atteint par des retombées des essais ARCTURUS (1967) et ENCELADE (1971). Le tableau ci-après présente les principales mesures effectuées par le PCR.

Caractéristiques des retombées sur l'atoll de TUREIA

EXPERIMENTATION	DUREE	NATURE	DEBIT DE DOSE MAX*	DEBIT DE DOSE FIN RETOMBEE	DEPOT AU SOL (β ,?)
ARCTURUS 02/07/67 -17h30 TU Mururoa	3h H+8h30àH+11h30	Particules Pluies	30 μ Gy/h	16 μ Gy/h (H+11h30)	3,3 10 ⁶ Bq/m ² (H+24h)
ENCELADE 12/06/71 -19h15TU Mururoa	14h H+10hàH+24h	Pluies	55 μ Gy/h	20 μ Gy/h (H+24h)	1,3 10 ⁷ Bq/m ² (H+22h45)

* passage du nuage

Quelques heures après l'essai sur barge ARCTURUS (23 kt) une frange du pied du nuage a dévié de la trajectoire principale se dirigeant vers le Nord-Est pour se diriger vers le Nord puis vers l'Ouest (retour anticyclonique). Après la retombée les pluies du 04/07/67 ont entraîné un abaissement du débit de dose d'environ 50%. A H+55 heures, le débit de dose était de 1,25 μ Gy/h.

Pour ENCELADE, essai de moyenne énergie (440 kt, nuage principal stratosphérique), la retombée s'explique par une situation météorologique complexe et évoluant rapidement dans les heures qui ont suivi le tir. Cette situation (présence d'un talweg évoluant du Sud vers le Nord) a conduit à des intrusions quasi-laminaires d'air stratosphérique jusque dans les basses couches de la troposphère. La retombée est intervenue durant la nuit sous forme de pluies abondantes (10 litres/m² entre H+8h50 et H+15h30). Les habitations ont offert une protection substantielle (débit de dose divisé par trois environ dans les habitations).

Retombée sur Tahiti

Des retombées intermédiaires consécutives à l'essai CENTAURE, ont atteint l'île de Tahiti. Le tableau ci-après concerne les mesures relevées au poste de contrôle de la radioactivité de Mahina.

Caractéristiques de la retombée CENTAURE sur TAHITI

EXPERIMENTATION	DUREE	NATURE	DEBIT DE DOSE MAX.	DEPOT AU SOL (β ,?)
CENTAURE 17/07/74 -17h TU Mururoa	20h30 H+43h30à H+64h	Pluies	3,9 μ Gy/h (H+54h)*	2 10 ⁶ Bq/m ² (J+2)

* Fin de la retombée principale

Le nuage stabilisé de l'essai de faible énergie CENTAURE (4,5 kt) a atteint une altitude relativement faible (4000 mètres). Le nuage principal a formé plusieurs nuages secondaires qui ont suivi des trajectoires distinctes globalement dirigées vers l'ouest (retour anticyclonique).

L'île de Tahiti a été abordée par l'Est. Des précipitations de forte intensité conjuguées aux effets de relief (blocage des nuages) ont conduit à un dépôt au sol hétérogène ».

➤ L'évaluation des expositions induites

L'homme peut être exposé aux rayonnements ionisants suite à une retombée par plusieurs voies. L'exposition externe se produit lors du passage du nuage et provient ensuite des particules déposées sur le sol. L'exposition interne provient de l'inhalation pendant la retombée puis de l'ingestion d'aliments contenant des radioéléments.

Pour l'exposition par ingestion, les iodes constituent les radioéléments dimensionnants et les aliments critiques sont, a priori, l'eau de boisson lorsqu'il s'agit d'eau de pluie, le lait de production locale ainsi que les légumes frais.

Pour les calculs d'exposition externe, on considère que les dépôts au sol se maintiennent en surface pendant l'année qui suit l'essai. Cette hypothèse simplificatrice, qui conduit à une importante sur-estimation de l'exposition, s'impose en raison de l'impossibilité à prendre en compte les caractéristiques des sols qui conditionnent la migration et le lessivage.

Le calcul de la dose efficace doit tenir compte de la protection offerte par les habitations et les bâtiments. Pour la Polynésie, on considère que les populations passent en moyenne 30 % de leurs temps à l'intérieur. Le coefficient

de protection des habitations, de construction légère, a été évalué à 0,5 et celui des abris de prévoyance à 0,3.

➤ L'exposition externe¹⁸

« L'exposition externe conduit à des doses efficaces comprises entre 0,6 et 3,4 mSv (tableau ci-dessous) pour la première année suivant chaque retombée. Ces valeurs ont été calculées à partir des mesures réalisées par les PCR pendant et dans les heures qui suivent la fin de chaque retombée. La dosimétrie par film témoin porté par du personnel affecté sur les lieux au moment des retombées a permis, dans certains cas, de vérifier ces évaluations. »

Doses efficaces reçues par irradiation externe dans l'année suivant chaque retombée

EXPERIMENTATION	DATE	LIEU	DOSE EFFICACE (Sv)
ALDEBARAN	02/07/66	GAMBIER	$3,4 \cdot 10^{-3}$
ARCTURUS	02/07/67	TUREIA	$7 \cdot 10^{-4}$
ENCELADE	12/06/71	TUREIA	$9 \cdot 10^{-4}$
PHOEBE	08/08/71	GAMBIER	$9 \cdot 10^{-4}$
CENTAURE	17/07/74	TAHITI (Mahina)	$6 \cdot 10^{-4}$

➤ L'exposition interne¹⁹

Exposition interne par inhalation lors du passage du nuage

L'exposition interne par inhalation est estimée à partir des relevés de la concentration atmosphérique ou à défaut, à partir du dépôt au sol. Les doses efficaces, présentées dans le tableau ci-après, ont été calculées à l'aide de Limites Dérivées de Concentration Atmosphériques (LDCA) correspondant à un mélange de produits de fission.

¹⁸ Document Ministère de la Défense/CEA précité

¹⁹ Document Ministère de la Défense/CEA précité

Exposition interne par inhalation en dose efficace

EXPERIMENTATION	DATE	LIEU	EXPOSITION Bqh/m ³ produits de fission	LDCA ⁽¹⁾ Bq/m ³	EQUIVALENT DE DOSE EFFECTIF Sv
ALDEBARAN	02/07/66	GAMBIER	6 10 ⁴	8400	1,8 10 ⁻⁴
ARCTURUS	02/07/67	TUREIA	8000	9000	2,3 10 ⁻⁵
ENCELADE	12/06/71	TUREIA	800	9000	3 10 ⁻⁶
PHOEBE	08/08/71	GAMBIER	600	7300	2 10 ⁻⁶

⁽¹⁾ LDCA = Limite de Concentration dans l'air

Exposition interne par l'ingestion d'eau

L'eau de pluie provenant des toits des fares est recueillie dans une citerne pour l'alimentation en eau à Tureia. Pour Rikitea, principal village des Gambier (499 habitants en 1971), l'alimentation est assurée à partir d'un réservoir collectant les eaux d'infiltration. A Tahiti, l'eau de boisson provient de sources et dans ce cas l'exposition induite est négligeable.

Les doses efficaces présentées sur le tableau ci-dessous ont été estimées à partir des mesures pour une consommation de 2 litres d'eau par jour et en prenant les facteurs de dose recommandés par la CIPR. Seuls les iodes sont pris en compte car leur contribution à la dose est dimensionnante.

Estimations des doses efficaces dues à l'eau de boisson

EXPERIMENTATION	DATE	LIEU	CONCENTRATION MAX P.F Bq/l	DOSE EFFICACE Sv
ALDEBARAN	02/07/66	GAMBIER	1600(J+6)	1,4 10 ⁻⁴
ARCTURUS	02/07/67	TUREIA	5500 (J+2)	6 10 ⁻⁵
ENCELADE	12/06/71	TUREIA	4,2 10 ⁴ (J+1)	3,1 10 ⁻⁴
PHOEBE	08/08/71	GAMBIER	800(J+10)	3,5 10 ⁻⁵

A Rikitea, le mode d'alimentation en eau par collecte des eaux d'infiltration contribue à limiter l'exposition interne par ingestion.

Exposition interne par l'ingestion de lait

Le dépôt de produits de fission sur les pâturages de Tahiti, principalement situés sur le plateau de Taravao, a entraîné la présence d'iode dans le lait dans les jours qui ont suivi la retombée consécutive à l'essai CENTAURE en Juillet 1974. La production locale de lait était collectée dans sa quasi-totalité, par la laiterie de Taravao. Dans le cas le plus défavorable, celui des nourrissons qui auraient consommé du lait frais uniquement issu des cheptels locaux, ces niveaux conduisent, pour une consommation de 0,7 litre par jour à une dose efficace de $2,7 \cdot 10^{-4}$ Sv. En fait, ce lait était uniquement destiné à fabrication de fromages et de yaourts pour lesquels le délai d'affinage est de quelques semaines. Les habitudes locales conduisaient à nourrir les nourrissons avec des laits en poudre ou stérilisés. De plus, la production locale de lait ne couvrait que 18% de la consommation. En tenant compte de ces facteurs, la dose efficace attribuable à l'ingestion de lait est de $5 \cdot 10^{-5}$ Sv dans le cas le plus critique (nourrisson).

Exposition interne par l'ingestion des autres aliments

Le tableau ci-après résume les doses efficaces induites par l'ingestion d'iodes déposés sur les aliments autres que l'eau et le lait. Ces estimations ont été établies à partir de mesures sur les denrées alimentaires produites localement. Pour les îles Gambier, l'essentiel de la dose provient des légumes verts (feuilles, salades) et pour Tureia, des produits du lagon en particulier des mollusques filtrants comme les bénitiers.

Doses efficaces induites par l'iode
pour l'ingestion des aliments autres que le lait et l'eau

EXPERIMENTATION	DATE	LIEU	DOSE EFFICACE (Sv)
ALDEBARAN	02/07/66	GAMBIER	$1,2 \cdot 10^{-3}$
ARCTURUS	02/07/67	TUREIA	$5 \cdot 10^{-5}$
ENCELADE	12/06/71	TUREIA	$6 \cdot 10^{-5}$
PHOEBE	08/08/71	GAMBIER	$1,4 \cdot 10^{-4}$
CENTAURE	17/07/74	TAHITI	$2,5 \cdot 10^{-5}$

Pour ces aliments, la contribution des autres radionucléides à la dose efficace par ingestion représente environ 30 % aux Gambier en 1971 et 50% à Tureia en 1971 et à Tahiti en 1974 ; pour l'évaluation de la dose efficace totale, ces coefficients ont été utilisés. »

3.3. Les incidences relevées par l'UNSCEAR et l'AIEA

Les relevés et mesures faits par l'UNSCEAR précédemment ont été repris par l'AIEA dans le rapport du Comité Consultatif International (CCI) sur la situation radiologique des atolls de Mururoa et Fangataufa publié en 1998 et dont il est largement rendu compte à partir de la page 86 de la présente étude (cf. infra 3.2). Le mandat de ce comité ne comprenait pas l'analyse rétrospective des retombées des essais atmosphériques mais dans la mesure où elle a néanmoins été abordée, il a paru souhaitable d'en donner connaissance ici. Ces éléments sont précisés dans le rapport du CCI par l'encadré ci-après :

DOSES ESTIMEES DUES AUX MATIERES RADIOACTIVES RESIDUELLES

Encadré 9

DOSES PASSEES DUES AUX RETOMBES QUI SE SONT PRODUITES AU MOMENT
DES ESSAIS NUCLEAIRES FRANÇAIS EFFECTUES DANS L'ATMOSPHERE

Le mandat de l'Etude fait référence uniquement à la situation radiologique présente et future sur les atolls, et non aux doses reçues par les habitants de la région du Pacifique Sud du fait et au moment des essais atmosphériques effectués entre 1966 et 1974, ou par les personnes qui participaient à la réalisation du programme d'essais nucléaires. Néanmoins, le CCI a estimé qu'il serait intéressant d'inclure dans son rapport des renseignements sur les doses reçues dans la région à l'époque et a demandé au Secrétariat de l'UNSCEAR d'examiner les données existantes. Le présent résumé est basé sur les informations fournies par le Directeur du Secrétariat de l'UNSCEAR.

Pour l'hémisphère Sud en général, les essais nucléaires effectués à Mururoa et Fangataufa ont été à l'origine de 13 % du dépôt total de radionucléides résultant de tous les essais d'armes nucléaires. Pour 1998, le débit de dose annuel moyen dans toute la bande de latitude 20°-30° S dû aux retombées mondiales de tous les essais d'armes nucléaires est de l'ordre de 0,002-0,003 mSv, dont environ 0,0004 mSv peut être attribué aux essais nucléaires réalisés sur les deux atolls. (A titre de comparaison, la dose individuelle due aux retombées mondiales est actuellement, en moyenne annuelle mondiale, d'environ 0,01 mSv.) Les maximums des doses effectives annuelles dues à tous les radionucléides présents dans les retombées mondiales dans les années au cours desquelles se déroulaient les essais atmosphériques (0,025 mSv) ont été 100 fois inférieurs aux doses annuelles normales dues au fond naturel de rayonnement (~ 2 mSv), et actuellement les doses effectives annuelles sont grosso modo encore dix fois moins élevées (0,002-0,003 mSv).

Environ 5 000 personnes vivaient dans un rayon de 1 000 km autour du site d'expérimentation français, et il y a eu des expositions locales, lors de cinq essais en particulier (voir le tableau V) en raison de conditions inhabituelles de vent et de précipitations. Quatre essais ont donné lieu, au cours de la première année qui les a suivis, à des doses effectives de 1 à 5 mSv aux habitants de Tureia (l'atoll habité le plus proche, situé à 130 km au nord de Mururoa) et des îles Gambier (à 400 km au sud-est de Mururoa) en 1966-1971. Un essai a été à l'origine de doses allant jusqu'à 0,8 mSv aux habitants de Tahiti (1 200 km au nord-ouest de Mururoa) en 1974. Seules quelques personnes habitant sur ces îles auront reçu les doses maximums estimées qu'indique le tableau V. A Tahiti par exemple, la plupart des personnes auront reçu seulement des expositions externes. Quelques expositions internes résultant de l'ingestion de légumes verts ou de mollusques du lagon ont été estimées pour les autres îles.

Les expositions qui se sont produites à cette époque étaient dues essentiellement aux retombées de radionucléides à courte période, comme l'iode radioactif (spécialement ¹³¹I, qui a une période de huit jours). Les concentrations de ¹³¹I dans le lait ont été mesurées en de nombreux endroits de l'hémisphère Sud à l'époque des essais nucléaires atmosphériques sur les atolls de Mururoa et Fangataufa. On pense que les doses équivalentes à la thyroïde reçues par les personnes du fait des essais nucléaires sur les deux atolls n'ont pas dépassé 10 mSv sur toute la période des essais atmosphériques (1966-1974).

TABLEAU V. DOSES PASSEES DUES AUX RETOMBES AU MOMENT DES ESSAIS
ATMOSPHERIQUES FRANÇAIS — PERSONNES LES PLUS EXPOSEES

Date de l'essai	Lieu de l'exposition	Dose effective au cours de la première année (mSv)			
		Externe	Inhalation	Ingestion	Total
2 juillet 1966	Iles Gambier	3,4	0,18	1,9	5,5
2 juillet 1967	Atoll de Tureia	0,7	0,023	0,17	0,9
12 juin 1971	Atoll de Tureia	0,9	0,023	0,43	1,3
8 août 1971	Iles Gambier	0,9	0,002	0,24	1,2
12 juillet 1974	Tahiti (Mahina)	0,6	0,08	0,06	0,8

A l'issue de cet examen des retombées atmosphériques qui permet de cerner directement les limites de celles-ci dans des proportions tout à fait rassurantes, notamment au regard des différentes comparaisons que l'on peut faire avec d'autres sites, sans parler de celles que l'on ne peut pas ou plus faire, on regrettera d'autant plus l'absence du Tome IV de l'ouvrage « Les atolls de Mururoa et Fangatafa » (DIRCEN/DAM du Ministère de la Défense et du CEA) qui doit traiter des problèmes liés aux retombées radioactives et dont les trois premiers tomes sont parus en décembre 1995 (I. Géologie, pétrologie, hydrologie. ; II. Les expérimentations nucléaires-effets mécaniques, limino-thermiques, électromagnétiques ; III. Le milieu vivant et son évolution).

4. Les incidences relevées par des instances extérieures

Le point le plus ausculté de la planète l'a été par des instances étrangères étatiques ou scientifiques, internationales et des instances françaises extérieures aux Armées et au CEA. On évoquera ainsi leurs différentes observations et analyses en détaillant quelque peu celles dont l'ampleur des travaux le justifie.

4.1. Du début à 1982

➤ En 1971 en Australie, l'Atomic Weapons Tests Safety Committee estime que les doses absorbées dues aux retombées des essais nucléaires français en Polynésie ne sauraient constituer un danger pour les populations des pays intéressés.

➤ En 1972, une Commission scientifique réunit au mois de juin à Guyaquil des spécialistes des cinq pays Andins (du Chili à la Colombie) pour analyser les effets de la radioactivité produite par les essais français ; elle conclut que « *dans le domaine écologique, maritime et terrestre, il a été vérifié que la contamination radioactive n'est pas significative* »²⁰.

➤ En Avril 1973, le National Radiation Advisory Committee australien et en mai de la même année, son homologue Néo-Zélandais reconnaissent que ces essais ne constituent pas un danger pour les populations.

Ces constatations n'empêchent nullement certains des gouvernements concernés d'entamer des procédures devant la Cour internationale de Justice de La Haye, ou à envoyer des bâtiments dans le voisinage de Mururoa. Le Pérou, quant à lui, rompt ses relations diplomatiques avec la France au motif que les essais nucléaires atmosphériques français seraient à l'origine d'un tremblement de terre survenu en juillet 1971 dans les Andes... il y a lieu de noter à ce sujet que la France avait pris l'initiative en 1966 d'aider les pays andins à mettre en place sur leurs territoires un dispositif de mesure de la radioactivité.

²⁰ Livre Blanc sur les expérimentations nucléaires (1973)

➤ En juin 1982, M. Haroun Tazieff, alors Commissaire à l'étude et à la prévention des risques naturels majeurs, effectue une mission scientifique au CEP orientée naturellement à ce moment sur les essais souterrains. En octobre de la même année, il précise dans une interview : *« En 1975, j'étais déjà allé à Mururoa pour donner mon opinion de volcanologue (le soubassement de l'atoll étant un volcan éteint). Notre conclusion avait été que, si l'on faisait des essais à profondeur suffisante, il n'y avait, d'après nous, aucun danger de pollution. Or, j'étais un expert appartenant à l'opposition aux essais. J'étais un adversaire ! Mais l'honnêteté scientifique est de dire ce que l'on a constaté, pas ce que l'on voudrait »*.

S'agissant des essais atmosphériques, le groupe des scientifiques qui accompagnait M. Haroun Tazief en 1982 avait estimé que *« les explosions aériennes ont introduit dans l'atmosphère, l'océan et tous les organismes vivants, en particulier marins, une radioactivité significative mais non préoccupante au point de vue sanitaire »* et que *« depuis que les explosions sont souterraines, la contamination radioactive de l'environnement est devenue quasiment nulle à court terme »*.

4.2. La « mission Atkinson »

A la suite de demandes réitérées du Gouvernement Néo-Zélandais, le Président François Mitterrand accepte en mai 1983 la suggestion du Premier Ministre de ce pays de l'envoi d'une mission de scientifiques sur les sites d'expérimentations français. Cette mission, présidée par M. H.R. Atkinson à l'époque directeur du laboratoire national des radiations de Christchurch (Nouvelle-Zélande) comprenait en outre quatre autres scientifiques de haut niveau représentant l'Australie et la Papouasie-Nouvelle Guinée. Elle séjourna en Polynésie une douzaine de jours dont quatre à Mururoa. L'ensemble des moyens techniques et scientifiques ont été mis à la disposition de la mission, y compris le navire de recherches océanographiques « Marara » de la DIRCEN, ainsi que les moyens de conservation et d'envoi des différents échantillons prélevés. Le rapport indique d'ailleurs que *« la visite d'experts scientifiques dans une zone d'expérimentation militaire d'une autre nation devait être considérée comme unique »*. Toutefois les experts n'ont pas été autorisés à prélever des échantillons dans les parties Nord et Ouest de l'atoll de Mururoa, ni dans le sédiment du lagon alors que ce sont justement les zones où on eu lieu les essais atmosphériques, ce que l'AIEA a pu faire ultérieurement.

Le rapport Atkinson a constitué l'élément de référence essentiel dans l'analyse de la situation des atolls eux-mêmes jusqu'aux travaux en 1997 et 1998 respectivement de la Commission internationale géomécanique (présidée par M. Charles Fairhurst) et du Comité consultatif de l'AIEA mais qui eux ne visent que les essais souterrains . Ce rapport est structuré en quatre chapitres ainsi définis :

- l'impact radiologique des anciens essais atmosphériques, et effets de la contamination radioactive dans le Pacifique Sud ;
- l'intégrité structurelle et l'hydrologie de l'atoll de Mururoa ;

- les fuites et la dissémination à long terme de produits radioactifs, consécutivement aux essais souterrains ;
- le traitement réservé aux déchets radioactifs à Mururoa.

Compte-tenu de l'accent mis dans cette partie sur les incidences des essais atmosphériques, ce sont d'abord les conclusions du premier chapitre auxquelles il convient de faire une place :

«1 - Dans la zone tempérée australe, qui comprend la Nouvelle -Zélande, la plus grande contribution à l'exposition des radiations de la population, en raison des retombées radioactives, a été apportée par les produits de fission à longue période, issus des essais atmosphériques ayant eu lieu dans l'hémisphère nord. Environ 20 % du dépôt de produits de fission à longue période peuvent être attribués aux essais atmosphériques français dans les atolls de Mururoa et de Fangataufa. Dans les régions tropicales australes, le dépôt imputable aux retombées stratosphériques a été plus faible et, dans la zone tempérée de l'hémisphère nord, elle est environ 3 à 4 fois plus élevée que dans la zone tempérée de l'hémisphère sud.

2 - Les radionucléides à courte période, présents dans les retombées troposphériques dus aux essais atmosphériques dans l'hémisphère austral, ont engendré des doses variables d'une année à l'autre ; en Nouvelle-Zélande, l'apport de doses émanant de cette source était voisin d'environ la moitié de celle résultant des retombées stratosphériques, comme constaté certaines années. Dans les régions tropicales australes, on a observé des doses considérablement plus fortes en certaines occasions : en particulier, des chutes de pluie, à Samoa le 12 septembre 1966 et à Tahiti le 19 juillet 1974, ont augmenté les doses, ces années là, d'environ 10 fois la dose annuelle maximale, historiquement enregistrée (environ 20 micro-sieverts/an) dans ces mêmes lieux, imputable aux essais de l'hémisphère nord. Toutefois, les doses annuelles maximales estimées sont restées inférieures à 1/10ème de ce qui découle de l'exposition annuelle moyenne mondiale aux radiations naturelles (2.000 microsieverts/an) et très en-dessous des taux annuels mesurés dans les régions du monde ayant une haute radioactivité naturelle.

3 - Les doses annuelles (équivalent de dose engagée efficace) résultant des retombées en 1980 sont estimées avoir été d'environ 0,5 % du taux annuel moyen mondial de rayonnement naturel en Nouvelle-Zélande et à Tahiti et même quelque peu plus faible aux îles Fidji.

4 - Les niveaux ambiants de radiations, mesurés à l'extrémité Est de l'atoll de Mururoa sont généralement plus faibles qu'ailleurs dans le monde, en raison de la très faible concentration de radioactivité naturelle dans les sols coralliens.

Des traces des retombées globales dues aux essais atmosphériques sont détectables à des niveaux très en-dessous de ceux ayant une signification pour la santé.

5 - Les doses maximales reçues par le personnel employé à Mururoa et surveillé pour l'exposition aux radiations ne sont généralement que de petites fractions des doses limites admissibles pour

les travailleurs exposés aux radiations et recommandées par la Commission Internationale pour la protection radiologique. La plupart des expositions sont inférieures au seuil motivant d'être signalées.

6 - Les doses de radiations auxquelles est soumise la population de la Polynésie Française, en raison du rayonnement naturel et de la radioactivité des retombées, sont plus basses que les niveaux moyens mondiaux et ne conduisent pas à penser que des maladies quelconques provoquées par des radiations pourraient être décelables. Les données statistiques sur le cancer dans cette région ne peuvent aucunement suggérer l'existence d'une proportion élevée de tumeurs de certains organes qui pourrait être associée à une exposition excessive des retombées radioactives.»

Ces conclusions rejoignent ce qui avait été observé précédemment par d'autres instances (cf. supra) et ce qui a encore ultérieurement été confirmé par les mêmes ou par d'autres encore.

➤ S'agissant des incidences régionales, c'est-à-dire des retombées au-delà des archipels des Tuamotou, Gambier, îles de la Société (Tahiti), une observation simple mais essentielle doit être rappelée : les essais nucléaires atmosphériques faits par les Américains et les Britanniques dans le Pacifique de 1957 à 1962 ont eu nécessairement une part importante dans les émissions de particules radioactives à retombées non locales. L'île de Malden est à 1 600 km de Bora-Bora, Christmas à 2 200 km. On dispose de peu d'informations à ce sujet mais il est clair que le nombre et la puissance de certains doivent être prises à due concurrence dans l'ensemble des essais. On compte ainsi :

- pour les Britanniques : trois tirs thermo-nucléaires à Malden Island (1,22 Mt au total), six tirs de même type à Christmas Island (6,65 Mt),
- pour les Américains : 24 à Christmas Island (23,3 Mt), Johnston étant, quant à elle, sensiblement plus éloignée.

IV – L'expertise des incidences environnementales en Polynésie : les essais souterrains

➤ Les incidences des essais souterrains constituent une question dont les termes sont, pour l'essentiel, connus depuis plus d'une vingtaine d'années et ont été précisés lors du rapport de l'Office sur « L'évolution et la recherche sur la gestion des déchets nucléaires à haute activité » dont l'un d'entre nous avait été chargé²¹.

²¹ Tome II – Les déchets militaires (décembre 1997), Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, M. Christian Bataille, rapporteur

➤ Des éléments de réponse ont naturellement été apportés en leur temps pour les essais souterrains par les missions dont on a évoqué les travaux au sujet des essais atmosphériques (Tazieff, Atkinson et Cousteau).

➤ Mais l'essentiel sinon la totalité des réponses aux questions des incidences environnementales est maintenant formé par les travaux des deux instances spécialement constituées à cette fin : le Comité consultatif international de l'AIEA et la Commission géomécanique internationale.

➤ Les expertises exhaustives rendues en 1998 : AIEA et Commission géomécanique devaient répondre à :

- la nécessité d'aller au-delà des éléments de réponse tout à fait valides mais partiels ou anciens ;
- la nécessité d'une réponse exhaustive, et ce après la cessation définitive des essais, à l'aide de moyens techniques adaptés à l'enjeu, dans des délais confortables mais raisonnables pour des expertises scientifiques d'un tel niveau pour lesquelles il a été fait appel à une large palette de spécialistes.

C'est dans le cadre de la reprise des essais nucléaires souterrains et à la suite des réactions que cette décision avait suscitées qu'en septembre 1995 le Président de la République, Jacques Chirac, déclara que deux commissions scientifiques internationales composées d'experts indépendants seraient saisies, à la demande de la France, pour examiner les effets de ces essais sur l'environnement aussi bien du point de vue radiologique que du point de vue géologique et, notamment, de la stabilité des atolls.

La situation radiologique des atolls de Mururoa et Fangataufa a été l'objet de l'étude confiée au Comité consultatif international de l'AIEA réuni sous la présidence de Madame E. Gail de Planque (Etats-Unis). C'est l'étude dont le champ était le plus large. La stabilité et le régime hydrologique des atolls en liaison avec les effets des essais nucléaires a été l'objet de la seconde étude qui a été confiée à une Commission géomécanique internationale constituée spécialement sous la présidence du professeur Charles Fairhurst (Etats-Unis).

On présentera d'abord les travaux et conclusions de cette dernière commission, au domaine de compétence plus précis. Trois membres de celle-ci avaient également participé au groupe de travail de l'AIEA consacré au transport des radionucléides dans le massif rocheux, puisque les mouvements des substances radioactives sont directement reliées aux conséquences hydrologiques des essais.

1. L'étude de la Commission géomécanique internationale

1.1. La Commission géomécanique internationale

L'indépendance et les conditions dans lesquelles la Commission (Président : M. Charles Fairhurst) entendait œuvrer ont été dès l'origine fixées par celle-ci : « *Les autorités françaises et les membres de la Commission ont attaché une importance toute particulière à l'indépendance de l'étude de la CGI. L'objet général des investigations, la stabilité et l'hydrologie, était défini par la lettre de M. de Charette, mais la CGI a considéré qu'il lui appartenait de définir sa propre méthode de travail et le détail du contenu de ses travaux. Ainsi, bien que la lettre de mission parle de « ...l'évaluation des effets de cette série d'essais... », la Commission a rapidement décidé que l'étude des effets des expérimentations sur la stabilité et l'hydrologie des atolls devait être replacée dans le contexte de la série complète des 147 essais nucléaires souterrains réalisés à Mururoa et Fangataufa. De la même manière, le choix des questions particulières méritant d'être traitées a été effectué par la Commission* ». ²²

La Commission s'est répartie en sous-groupes : stabilité et hydrologie. Elle s'est réunie douze fois de mars 1996 à octobre 1997 (dont cinq réunions plénières).

La Commission a pu disposer, outre la littérature ouverte existante au début de ses travaux (dont les missions extérieures et différentes thèses et publications scientifiques) des deux tomes de l'ouvrage DIRCEN/DAM sur les deux atolls publiés au début de l'étude et surtout « *par une série mise à jour et plus détaillée de 12 rapports techniques préparés par les scientifiques du CEA (de nouveau en français et en anglais). Ces documents, référencés ici comme Documents DIRCEN/CEA n° 1 à 12, ont été intensivement utilisés par la Commission* ».

Quoique la publication plus tardive que prévu de ces rapports ait été initialement une source de gêne pour les membres de la CGI, on peut estimer, rétrospectivement, qu'elle a eu un effet positif, en ceci que les membres ont été contraints de reconstruire une compréhension qui leur soit propre de la mécanique des explosions nucléaires souterraines et de leurs effets sur la stabilité et l'hydrologie des atolls. Ceci a fourni l'occasion d'une intelligence des phénomènes, formée de manière indépendante, plus profonde que ne l'aurait permis une approche qui aurait plutôt été fondée sur une revue critique des rapports du CEA quand ils eussent été disponibles » ²³.

La préparation et la traduction de ces rapports constituaient en temps utile un réel défi comme l'évoque la CGI elle-même.

La Commission s'est rendue sur les atolls en juillet 1996. Les problèmes principaux déterminés par la Commission elle-même (cf. supra) ont été les suivants :

²² Rapport version française – Préface page 190

²³ Rapport CGI – version française – page 194

- Doit-on attendre une poursuite significative de l'affaissement, ou *subsidence*, de parties émergées de l'atoll ?
- Doit-on attendre que des glissements de terrains importants affectent les pentes extérieures de l'atoll ?
- Des fractures majeures ont-elles été créées en profondeur dans les atolls - notamment, les fractures visibles en surface constituent-elles la trace d'un réseau qui s'étendrait en profondeur sous l'atoll ?
- Y-a-t-il eu des changements de l'hydrogéologie naturelle de l'atoll, dont la convection d'origine thermique est un trait majeur, suffisamment importants pour accélérer significativement le transport des radionucléides de vie longue vers le lagon et l'océan?²⁴

1.2. Résumé des résultats, conclusions et recommandations du rapport :

« 1° Environ 5% du volume total de roches volcaniques compris entre 500 mètres et 1500 mètres de profondeur sous la surface, à Mururoa aussi bien qu'à Fangataufa, a été endommagé du fait des essais nucléaires souterrains. Il n'y a eu aucun endommagement au-delà de 1500 mètres de profondeur.

Une partie des premiers essais, conduits sous la couronne de Mururoa, ont produit un endommagement des roches carbonatées depuis le sol jusqu'à une profondeur de 200 mètres, en entraînant des affaissements de surface visibles qui atteignent jusqu'à 2 mètres ; ces effets concernent environ 3% du volume total des couches carbonatées.

2° Associés à l'endommagement des carbonates dans la couronne sud-ouest de Mururoa, on constate un ensemble de glissements de pentes sous-marines, dont la plus grande intéresse quelques 0,1 km³ de matériaux principalement détritiques. Sur la pente nord-est de Mururoa, une déformation de fluage permanente s'est prolongée pendant presque deux décennies, elle se manifeste par de longues fractures ouvertes de surface, parallèles à la couronne, présentes à la fois du côté du lagon et du côté de l'océan. Des fractures analogues se sont développées sur la couronne nord-est de Fangataufa.

3° Ces affaissements et fractures dans les carbonates n'affectent pas le massif volcanique sous-jacent avec lequel elles ne sont pas en communication; elles sont particulières aux portions des carbonates les moins résistantes, ou constituant la couronne émergée.

4° A l'exception de la pente nord-est de Mururoa, qui se déforme encore par fluage (avec une vitesse qui décroît au cours du temps) et peut-être (à un moindre degré) de la pente nord-est de Fangataufa, les deux atolls sont partout stables et les

²⁴ Rapport CGI – version française – page 227

soubassements volcaniques sont structurellement sains ; les cavités et cheminées, remplies de déblais, supportent efficacement les couches sus-jacentes.

5° II n'y aura pas d'impact à long terme (500 - 10 000 ans) sur l'hydrologie globale d'aucun des deux atolls.

6° Les augmentations de température au voisinage du centre de chacune des explosions ont entraîné des accroissements détectables de la vitesse ascendante de l'eau souterraine. Cet accroissement est particulièrement marqué dans les cas où la cheminée atteint les carbonates. Les accroissements de la vitesse de l'eau s'effaceront avec le temps, et les effets de la température seront imperceptibles après 500 ans.

Pour répondre aux questions posées précédemment, on peut plus particulièrement conclure :

7° II n'y aura pas, à Mururoa et Fangataufa, de nouvel affaissement (ou subsidence) majeur que l'on puisse attribuer aux campagnes d'essais. Il n'y a eu, et il n'y aura, aucun danger de volcanisme induit.

8° Un ou plusieurs grands effondrements sous-marins pourraient affecter les flancs de la couronne nord-est de Mururoa, intéressant un volume total de matériaux qui pourrait atteindre $0,6 \text{ km}^3$. (Les mouvements des pentes dans cette région sont surveillés de près de sorte qu'on disposerait d'une alerte adéquate en cas d'accélération du fluage). Des glissements analogues sont envisageables sur la couronne nord-est de Fangataufa, mais ils n'ont pas fait l'objet de surveillance. Aucun nouveau glissement ne doit être attendu dans la couronne sud-ouest de Fangataufa, où de tels glissements sont déjà survenus.

9° On n'a pas créé de fractures majeures s'enfonçant profondément à l'intérieur des atolls, et les fractures visibles à la surface ne s'étendent pas jusqu'au massif volcanique.

10° L'hydrologie des atolls n'a pas été modifiée de manière durable. Les radionucléides produits par la plupart des explosions nucléaires réalisées sont toujours convenablement confinés par une couverture suffisante de roches volcaniques relativement imperméables. Les explosions effectuées dans les carbonates, ou les explosions qui ont engendré des cheminées ou des zones endommagées atteignant les carbonates, ont donné lieu à des relâchements précoces, mais qui ne présentent pas un risque significatif pour l'environnement, de tritium, strontium et césium, dans les portions inférieures des carbonates (et donc dans le lagon et l'océan).

11° Les modifications, mentionnées plus haut en 1. et 2., qui sont survenues, n'ont pas une importance supérieure à celle des modifications naturelles, telles que la baisse du niveau de la mer due aux glaciations, ou la croissance et la régression du corail, que l'on doit attendre à moyen terme à Mururoa et Fangataufa. Les atolls de corail se développent en permanence; l'expérience historique montre que des changements topographiques, bien plus grands que ceux que l'on peut attribuer à

la série d'essais, surviennent quand on considère de longues périodes de temps. On sait que des événements isolés de la même ampleur que les glissements provoqués à Mururoa surviennent périodiquement.

12° Dans les régions peuplées du reste du monde, des changements de l'hydrologie et de la topographie, plus importants en termes quantitatifs, ont été induits par des activités humaines banales (et nécessaires) telles que l'agriculture de grande échelle, l'activité minière ou la construction des villes.

13° Il est recommandé que le système actuel d'instrumentation destiné à mesurer les déformations futures de la région nord-est de Mururoa soit maintenu et surveillé pendant les 20 prochaines années (ou jusqu'à l'apparition d'un effondrement, si celui-ci survient pendant cette période), afin qu'il informe en temps utile de l'imminence possible d'un effondrement.

14° Il est recommandé que les informations complémentaires qui ont conduit le DIRCEN/CEA à conclure que le fluage observé dans le nord-est de Fangataufa était stabilisé soient rendues publiques, avec l'objectif d'obtenir une évaluation indépendante du danger que des glissements sous-marins plus importants ne surviennent dans cette région.

15° Il est recommandé que les observations relatives au relâchement de radionucléides dans les carbonates inférieurs et dans les lagons de Mururoa et Fangataufa soient poursuivies, et que des études complémentaires analytiques et numériques soient menées afin de parvenir à une meilleure explication du mélange intensif d'eaux souterraines observé dans les carbonates.

Enfin, on note que les six essais de la campagne 1995/1996 ont tous été tirés dans le massif volcanique des parties centrales des atolls. Quoiqu'aucun détail spécifique concernant ces essais n'ait été fourni à l'I.G.C, il est clair que ces essais évitaient les risques de rupture dans les pentes associés aux essais sous la couronne. La poursuite de la surveillance du tritium relâché dans les carbonates des deux atolls devrait permettre d'évaluer si le confinement des essais est effectif ».

1.3. Stabilité des pentes et affaissements de surface

La surveillance proposée pour la pente nord-est de Mururoa va être détaillée à la fin de cette présentation du rapport de la CGI mais il convient de signaler ici deux points qui méritent d'être éclairés par des analyses contenues dans le rapport lui-même : d'une part des problèmes géomécaniques (stabilité des pentes) liés aux tirs pratiqués en 1976-1980, d'autre part le principe des tirs en puits profonds pratiqués en Polynésie, en comparaison avec les tirs pratiqués au Nevada.

➤ Problèmes géomécaniques, stabilité des pentes.

Le rapport explicite clairement, dans sa partie « historique des essais » (p. 251) l'origine, le mécanisme et les limites des effets négatifs des tirs pratiqués à l'époque :

« Il apparaît qu'une attention insuffisante a été portée aux problèmes géomécaniques pendant les phases initiales du programme d'expérimentation souterraine au CEP. Il est aujourd'hui évident, comme il est montré dans les Chapitres 4 et 5 du Volume II du rapport de la CGI, que des effets non désirés notables, comme l'affaissement de parties de la couronne et les glissements des flancs, auraient pu être évités si les premiers essais avaient été placés plus loin des franges extérieures des atolls, c'est-à-dire sous leur partie centrale et à plus grande profondeur. De plus, on aurait pu éviter que certaines cheminées n'atteignent la zone de transition ou les calcaires proprement dit, comme cela est arrivé au cours de 12 des essais de la période 1976-1980. Pour deux autres des premiers essais (Nestor et Enée) la qualité de la couverture volcanique s'est avérée pour empêcher une fuite précoce de radionucléides contenus dans la cheminée. Il faut reconnaître toutefois que cette lucidité est plus facile après coup: on a d'ailleurs fait remarquer que, si l'on se plaçait du point de vue de la sécurité, il était intrinsèquement plus sûr d'opérer sur terre plutôt que dans le lagon - et incidemment beaucoup moins cher.

Clairement, les effondrements de pente de la couronne sud à Mururoa, les vagues qu'ils ont provoquées et l'apparition, détectée dans les années 70, d'une lente déformation permanente affectant un large domaine de la pente de la couronne nord-est à Mururoa, rendirent impérative une révision complète de la stratégie d'expérimentation souterraine, le développement d'une technologie qui permette le forage de puits en grand diamètre (1,5 mètre) depuis des barges et des plates-formes opérant dans le lagon (Bouchez et Lecomte, 1996). et le basculement progressif de l'expérimentation du platier vers le lagon, qui a commencé en 1981. L'importance de ces changements a été soulignée par la Commission Tazieff (Tazieff, 1982). A partir de 1987, tous les essais, à l'exception d'un petit essai en novembre 1989, ont été conduits sous les deux lagons. Ainsi, depuis 1980, l'épaisseur minimale de couverture (volcanique) a été de 50 mètres puis, plus tard, de 100 mètres.

A l'exception de deux cas dans lesquels la couverture volcanique était inadéquate (elle a été endommagée)²⁵ il apparaît que la totalité des 91 essais conduits depuis 1980 n'ont entraîné aucun des effets locaux non désirés expérimentés antérieurement. (...) De même, ni les essais CRTV ni les essais de Catégorie 2 n'ont eu de conséquences significatives du point de vue de la stabilité et ils n'ont eu que des conséquences négligeables du point de vue de l'hydrologie ou du relâchement de radionucléides (AIEA, 1998b). (...)

²⁵ Mégarée (novembre 1985), sous le lagon de Mururoa, et Lycos (novembre 1989), sous le lagon de Fangataufa (voir Volume II, annexe C, essais de Catégorie 2).

Les modifications graduelles dans la manière dont les essais ont été conduits (le choix de points zéros plus profonds, et plus largement espacés ; sous les deux lagons, plutôt qu'au voisinage des flancs des atolls) nous conduisent à conclure, même si les documents DIRCEN/CEA ne fournissent guère d'information à ce sujet, que l'équipe technique concernée a vraisemblablement analysé la situation qui se présentait à l'occasion de chaque nouvel essai avec une approche aussi prudente et objective qu'elle le pouvait ».

➤ Dans la présentation d'ensemble, traitant des possibilités d'instabilités ultérieures, il formule le diagnostic suivant :

« En conclusion, la zone nord-est de Mururoa est fondamentalement la seule pour laquelle subsistent des préoccupations quant à la stabilité locale. Les modifications introduites en 1980 (c'est-à-dire la limitation des énergies des tirs sous la couronne et le déplacement des essais vers le sous-sol des lagons) ont supprimé l'éventualité d'une conséquence supplémentaire du point de vue de la stabilité, en un autre point des atolls, des expérimentations souterraines.

Les essais souterrains n'ont eu de conséquence globale pour la stabilité d'aucun des deux atolls. Cette conclusion est évidente quand on prend en considération l'extension géométriquement limitée des effets des tirs dans les zones d'essais, du point de vue de la stabilité ; elle est confortée par les observations (Document DIRCEN/CEA n° 7) selon lesquelles le niveau moyen de l'océan à Mururoa pendant les 17 dernières années n'a montré aucun écart à la tendance observée pendant la même période dans d'autres régions du Pacifique Sud ; en d'autres termes il n'y a eu aucun effet des essais nucléaires souterrains sur la stabilité d'ensemble de Mururoa. La même remarque vaut très probablement pour Fangataufa, mais aucune mesure spécifique du niveau de l'océan n'est disponible pour cet atoll ».

➤ Les affaissements de surface

Les effets des tirs souterrains selon les types de tirs et les terrains du Nevada et du CEP constituent l'une des rares comparaisons dont on dispose :

« Observées à la surface, ces cuvettes ou dénivellations paraissent semblables aux manifestations de subsidence que l'on peut observer au-dessus de nombre des essais souterrains conduits au Nevada Test Site (NTS) aux États-Unis, en particulier ceux conduits dans les tuffs non cimentés. Les autorités du CEA soulignent, toutefois, qu'il y a des différences essentielles entre ces deux types de phénomènes (voir Figure ci-après).

De fait,

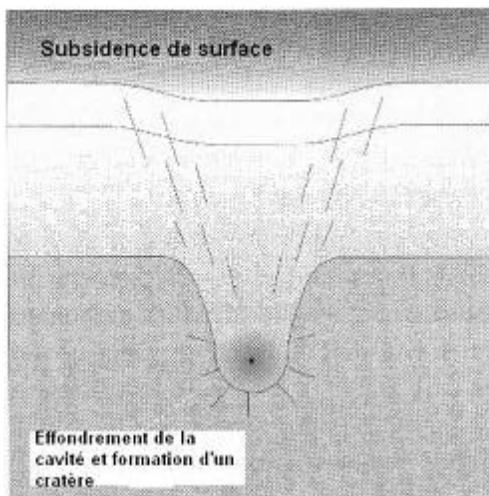
- (a) au NTS, les cuvettes de subsidence sont la manifestation en surface d'une cheminée d'effondrement qui forme un lien continu entre le point zéro souterrain et la surface du sol, dont le résultat est l'existence de passages très perméables reliant

directement le point d'explosion à la surface, et donc une « fuite » possible des radionucléides les plus volatils vers la biosphère ou l'environnement accessible ; tandis que

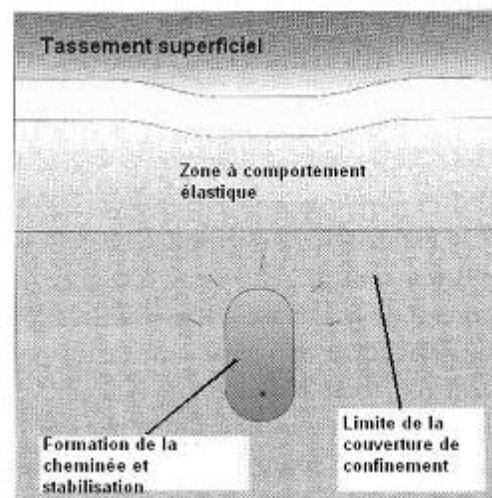
- (b) au CEP, les profondeurs auxquelles ont lieu les tirs sont considérablement plus grandes, avec comme conséquence qu'une zone intacte de roches volcaniques subsiste au-dessus de la cheminée après un essai. De ce fait les radionucléides sont «confinés » dans la cheminée et isolés de la surface. Dès lors, les cuvettes d'affaissement au CEP n'ont qu'un caractère superficiel, et n'affectent pas plus que les 100 à 200 mètres supérieurs de carbonates.

Comme mentionné plus haut, les configurations géologiques et hydrologiques dans les deux sites d'essais sont aussi très différentes. Au CEP, les roches volcaniques, relativement résistantes quoique fracturées, sont recouvertes par quelques 300 à 500 mètres de carbonates moins résistants. Les roches volcaniques et les carbonates sont poreux et saturés jusqu'à la surface du sol. Au NTS, les tuffs volcaniques s'étendent depuis la surface du sol jusqu'à une profondeur plus grande que les points zéros, et la surface libre de la nappe est à une profondeur de 300 mètres environ, c'est-à-dire que le massif rocheux superficiel n'est pas saturé ».

(a) Nevada Test Site (NTS)



(b) Centre d'expérimentations du Pacifique



Comparaison entre la subsidence qui survient sur le Nevada Test Side (NTS) et les affaissements produits par les essais au CEP (d'après Bouchez et Lecomte, 1996) cité par l'étude de la Commission géomécanique internationale.

Il est à noter que ces deux croquis ne sont pas à la même échelle et ne reflètent pas la profondeur à laquelle les tirs ont été faits.

1.4. La surveillance proposée pour la pente Nord-Est de Mururoa et pour Fangataufa

➤ Surveillance proposée pour la pente nord-est de Mururoa

« L'arrêt des essais à Mururoa et Fangataufa a été suivi par un programme d'actions visant à reconstituer, autant que cela est possible, la situation de l'environnement naturel à la surface des atolls telle qu'elle existait avant les essais. Une grande partie des infrastructures associées aux essais ont été enlevées et le personnel a été réduit au minimum. L'accès aux atolls sera strictement limité dans le futur.

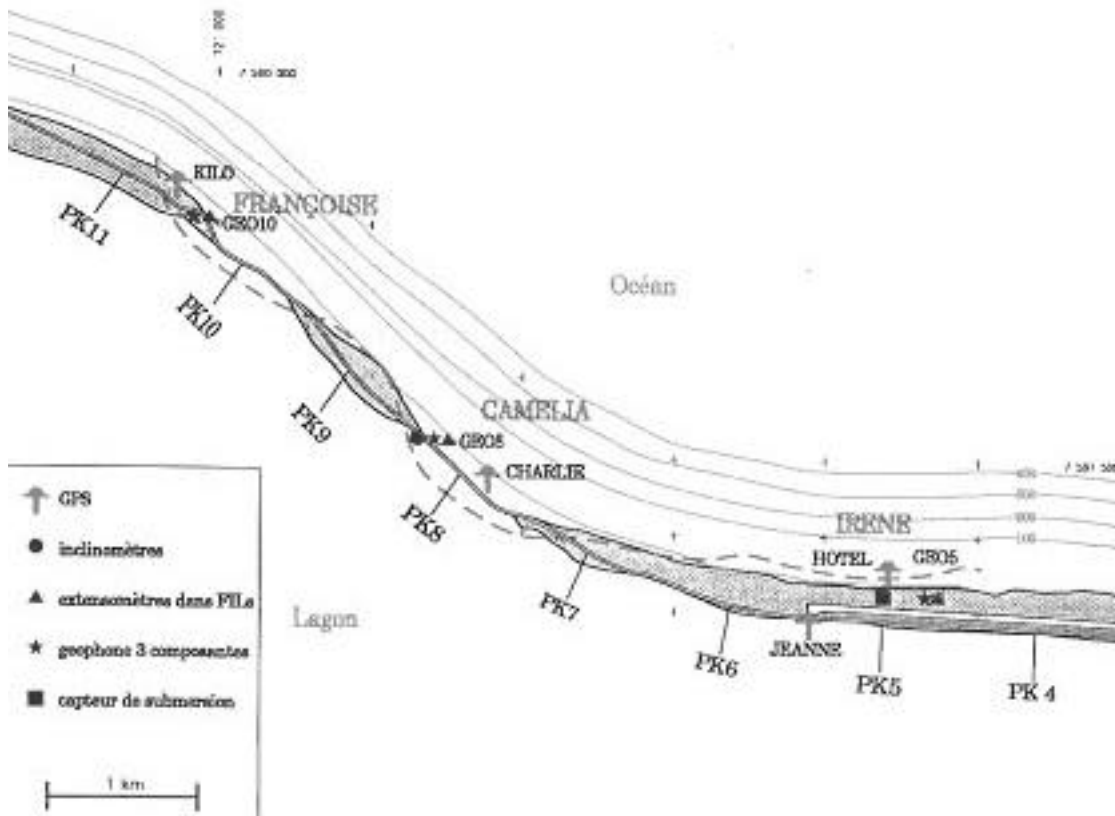
Il est heureux que les développements récents dans la mesure à distance permette de lire et interpréter à distance les données des instruments de surveillance sur les atolls: c'est-à-dire qu'il est possible de mettre en œuvre un programme de surveillance qui ne requiert qu'une intrusion minimale dans l'environnement naturel. Le programme élaboré par les scientifiques de la DIRCEN et du CEA reposera très largement sur la mesure à distance. Le système d'instrumentation proposé, montré schématiquement sur les deux figures ci-après est pour l'essentiel analogue à celui utilisé depuis 1980. Les données acquises pendant les 18 dernières années ont permis aux scientifiques du CEA de développer une très bonne compréhension des mécanismes en jeu et des vitesses qui affectent le massif qui se déforme. Ceci peut fournir un guide précieux pour la prévision du comportement futur du massif rocheux, et pour l'établissement de critères de sécurité qui assurent qu'une instabilité future ne conduira pas à un risque pour les personnels à Mururoa, ou pour qui que ce soit dans la région, notamment les habitants de Turéia (La probabilité de conséquences sérieuses d'une vague importante à 110 km de Mururoa devrait être faible, inférieure à celle d'événements naturels dans cette région, tels que tempêtes et tsunamis).

C'est aussi une caractéristique des déformations progressives de type fluage (c'est-à-dire dépendant du temps) de grandes pentes rocheuses que l'effondrement soit précédé par une période d'accélération du fluage qui peut être facilement détectée par une instrumentation telle que celle qui est aujourd'hui installée à Mururoa. Ce système est maintenant très complet et comporte une redondance suffisante pour assurer une surveillance appropriée, même en cas de panne ou de dysfonctionnement de l'une de ses composantes.

La procédure à suivre pour alerter le personnel du risque d'un effondrement imminent est basée sur la vitesse relative des déformations à un instant donné, mesurée par extensométrie sur des câbles horizontaux (voir diagramme supérieur ci-après) et dans les sondages, la vitesse mesurée avant 1985 servant de référence.

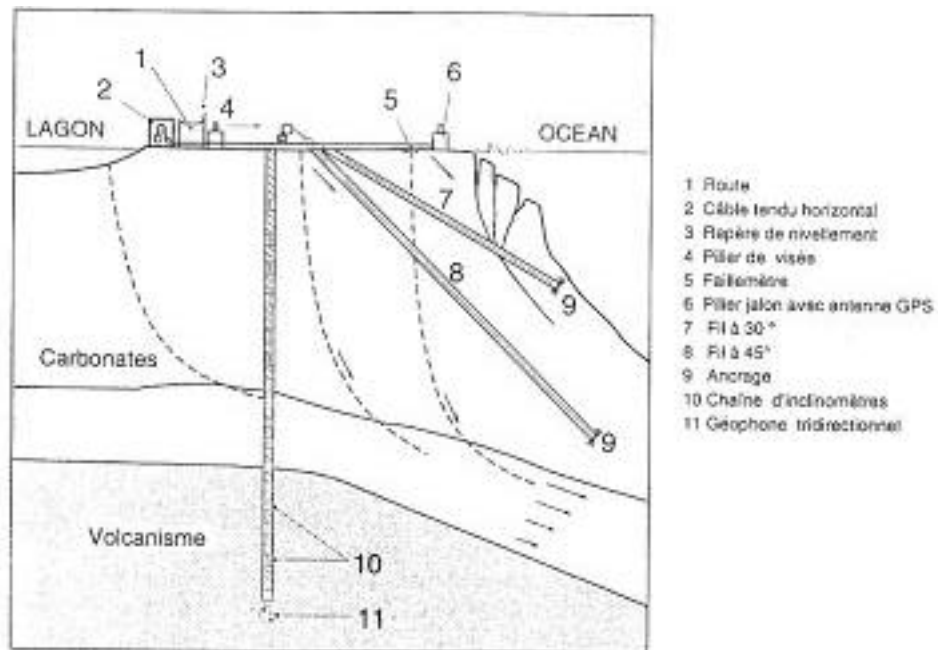
Comme indiqué dans le Document DIRCEN/CEA n° 12, la vitesse de déformation relative, couramment désignée comme V.R. (Vitesse Relative) est

traduite en niveau de risque, défini en termes de délai attendu avant un effondrement (imminent) majeur. Les définitions de ces niveaux de risque et des délais (avant l'effondrement) sont données ci-après ».



Système de surveillance dans la zone nord-est de la couronne de Mururoa ; vue en plan
(d'après DIRCEN/CEA n° 7)

Niveau 0	$VR < 2$	Situation normale.
Niveau 1	$2 < VR < 6$	Situation réversible. Pas de risque immédiat.
Niveau 2	$6 < VR < 12$	Situation réversible. Préavis supérieur à 1 semaine.
Niveau 3	$VR > 12$	Situation irréversible. Préavis supérieur à 1 jour.



« Quoique orienté vers la surveillance de la pente nord-est, le système de surveillance comportera des composantes qui vérifieront périodiquement la situation dans d'autres parties de l'atoll. On considère que le système implique deux parties : l'une est un système permanent fonctionnant en routine ; l'autre est un système complémentaire mis en œuvre quand une situation anormale est détectée. Les deux systèmes sont synthétisés dans les tableaux ci-après ».

Techniques utilisées pour surveiller l'évolution géomécanique normale (attendue) des atolls

Technique	Risque immédiat	Risque différé	Type de mesures	Région	Fréquence normales
Réseau microsismique sismographes et géophones	X	X	permanente	Mururoa	mesure continue
Réseau topographique de surface surveillé par le système géodésique spatial GPS		X	permanente	Nord de Mururoa	journalière
Réseau d'extensomètres		X	permanente	Nord de Mururoa	journalière
Réseau d'inclinomètres		X	permanente	Nord de Mururoa	journalière
Géomorphologie de surface par imagerie satellitaire		X	occasionnelle	Mururoa et Fangataufa	annuelle
Topographie de l'Atoll par relevé GPS		X	occasionnelle	N et SE de Mururoa	tous les 3 à 5 ans
Rattachement géodésique Régional		X	occasionnelle	atolls S. Tuamotu	tous les 3 à 5 ans
Photographie aérienne et relevés au sol de la fracturation de surface		X	occasionnelle	platier à Mururoa et Fangataufa	tous les 5 ans
Système acoustique remorqué pour déformation de surface		X	occasionnelle	récif corallien à Mururoa et Fangataufa	tous les 5 ans
Bathymétrie et sonar latéral en profondeur proche (30 à 300 m) surveillance des fractures sous-marines		X	occasionnelle	N et SE de Mururoa	tous les 5 à 10 ans
Relevé géomorphologique en eau profonde par bathymétrie (sondeur multifaisceau) et sismique haute résolution		X	occasionnelle	Flancs de Mururoa et Fangataufa	tous les 10 ans

Actions possibles et mesures complémentaires en cas d'évolution inattendue

Technique	Type d'Intervention	Région concernée	Fréquence
Observation visuelle et photographique du platier par reconnaissance aérienne	occasionnelle	Mururoa et Fangataufa	fonction du besoin
Cartographie des zones émergées par imagerie satellitaire	occasionnelle	Mururoa et Fangataufa	fonction du besoin
Relevé complémentaire de la topographie de surface	occasionnelle	variable	fonction du besoin
Mesure quantitative de la fracturation de surface par radar Système Acoustique Remorqué	occasionnelle	Platier de Mururoa et Fangataufa	fonction du besoin

« Toute indication de risque sera rapidement communiquée au personnel du site. Le détail des procédures à suivre pour l'alerte du personnel, la réparation et la mise à jour du système, etc., est fourni dans le Document DIRCEN/CEA n° 12.

Le plan actuel envisage une période de surveillance de dix ans. À l'issue de cette période, une décision sera prise quant au maintien (ou non) du système. Si le maintien est considéré comme nécessaire, le système sera mis à jour pour incorporer les améliorations technologiques alors disponibles en télémétrie, surveillance et instrumentation.

La CCI considère que le système décrit dans le Document DIRCEN/CEA n° 12 est bien conçu, qu'il utilise des techniques conformes à l'état de l'art, et qu'il est suffisamment complet pour assurer la sécurité de toutes les personnes susceptibles d'être affectées par un effondrement de pente, et en particulier un effondrement survenant dans la couronne nord-est de Mururoa..

➤ Surveillance proposée à Fangataufa

Le Document DIRCEN/CEA n° 12 indique que les observations relatives à la couronne nord-est de Fangataufa ont cessé en 1996. La CGI donne acte de ce que le volume de roches concerné par les déformations de pente et la fracturation, à Fangataufa, apparaît être plus faible qu'à Mururoa, et s'être stabilisé. Cependant, il serait bon de s'assurer qu'aucun mouvement supplémentaire n'est effectivement survenu au moyen d'examen visuels de la fracturation de surface dans cette région, par exemple tous les deux ans. Une autre façon de faire serait que les scientifiques du DIRCEN/CEA fournissent des informations plus détaillées sur les raisons qui les conduisent à conclure que la situation à Fangataufa est stable ».

2. Le rapport du Comité consultatif international de l'AIEA

2.1. Mandat de l'étude et principes d'organisation

➤ Les principaux points du mandat de l'étude sont ainsi précisés à partir de la demande qu'a formulée le Gouvernement français en septembre 1996 :

Principaux points du mandat de l'étude

« • L'Etude avait pour objet d'évaluer les conditions radiologiques sur les atolls après la fin des expériences nucléaires.

• Elle a porté à la fois sur la situation radiologique actuelle et sur la situation radiologique potentielle à long terme.

• Les buts de l'Etude étaient les suivants:

— évaluer la situation sur les deux atolls et dans les zones concernées du point de vue de la sûreté radiologique;

— déterminer s'il y a des risques radiologiques éventuels pour la population;

— faire des recommandations sur la nature, l'ampleur et la durée des activités de surveillance, des mesures correctives et des autres mesures de suivi qui pourraient être nécessaires.

• L'Etude avait donc un caractère prospectif; on a néanmoins noté et résumé dans l'Etude les évaluations radiologiques rétrospectives détaillées des essais nucléaires, auxquelles l'UNSCEAR avait procédé au fil des années.

• Un Comité consultatif international d'experts a été réuni par l'AIEA pour conseiller et guider celle-ci au plan scientifique pour toutes les questions liées à la conduite de l'Etude.

• Le Gouvernement français a communiqué les informations et les données nécessaires à la réalisation de l'Etude, notamment dans un certain nombre de domaines spécifiés, mais on a utilisé aussi, aux fins des évaluations, des informations pertinentes émanant de différentes sources.

• Les résultats, conclusions et recommandations de l'Etude devaient faire l'objet de rapports du CCI et être publiés par l'AIEA.”

➤ Il y a lieu de rappeler que cette étude a porté sur les atolls de Mururoa et Fangataufa, et ce dans leur totalité. Ces atolls, dans le passé récent et historique connu, n'ont jamais été habités et, par conséquent, la situation ne saurait se comparer avec des sites d'essais où des populations en ont été évacuées ou même déplacées en périphérie (îles Marshall, Semipalatinsk par exemple).

Au-delà de l'évaluation des conditions radiologiques actuelles, *« l'évaluation des conditions radiologiques à long terme avait pour but d'estimer les doses hypothétiques que des groupes de population locaux et des personnes vivant en n'importe quel point de la région du Pacifique sud pourraient recevoir à l'avenir à la suite du relâchement dans le lagon des atolls ou directement dans l'océan environnant de matières radioactives résiduelles qui se trouvent actuellement dans le sous-sol de Mururoa et de Fangataufa ».*

➤ Le rapport de l'AIEA précise dans les termes suivants l'organisation retenue pour la réalisation de cette étude²⁶ :

« Les organes mis en place pour l'Etude comprenaient un Comité consultatif international (CCI); deux groupes d'étude et cinq groupes de travail établis par le CCI; un Bureau pour la conduite du projet établi par l'AIEA; et un Bureau de liaison établi par le Gouvernement français.

Le Groupe d'étude A (appuyé par les Groupes de travail sur la "contamination du milieu terrestre" et sur la "contamination du milieu aquatique") a évalué les niveaux actuels de matières radioactives résiduelles dans l'environnement des atolls et dans les eaux qui les entourent, ainsi que les doses de rayonnements actuelles et futures attribuables à ces matières radioactives résiduelles. En se servant des informations fournies par le Groupe d'étude B, il a également évalué les doses de rayonnements potentielles auxquelles pourraient donner lieu à l'avenir les matières radioactives résiduelles présentes actuellement dans les cavités des expériences de sécurité et les "cavités -cheminées" résultant de l'effondrement des roches volcaniques situées au-dessus des cavités créées par les essais nucléaires sous les atolls.

Le Groupe d'étude B (appuyé par les groupes de travail chargés du "terme source", du "transport des radionucléides dans la géosphère" et de la "modélisation marine") a estimé la vitesse à laquelle les matières radioactives résiduelles présentes dans les cavités et dans les cavités-cheminées pourraient migrer à travers la géosphère et être relâchées dans l'océan environnant soit directement, soit par l'intermédiaire du lagon des atolls, et être dispersées finalement dans le Pacifique Sud, et a fourni ainsi la base nécessaire pour l'évaluation des doses à long terme attribuables à ces matières.

Outre le personnel du Secrétariat de l'AIEA, 55 scientifiques au total — dont les 14 membres du CCI — venant de 18 pays et de quatre organisations internationales ont participé à l'évaluation des conditions radiologiques, et notamment aux campagnes d'échantillonnage et de surveillance de l'environnement qui ont été menées à Mururoa et à Fangataufa.

Dix-huit laboratoires de 12 pays, ainsi que les Laboratoires de l'AIEA à Seibersdorf (Autriche) et son Laboratoire de l'environnement marin à Monaco ont pris part à l'analyse des échantillons prélevés dans l'environnement. »

²⁶ Rapport succinct page 20

Une vingtaine de réunions au total (la plupart étalées sur plusieurs jours) ont été tenues entre janvier 1996 et février 1998, qu'il s'agisse des réunions en plénière du CCI ou des différents groupes d'étude et groupes de travail.

Les campagnes d'échantillonnage et de surveillance tant terrestres qu'aquatiques et souterraines ont été menées d'une façon exhaustive au mois de juillet 1976 ainsi que le précise l'AIEA elle-même²⁷ :

➤ *« La campagne d'échantillonnage et de surveillance terrestres a été axée sur Mururoa et Fangataufa, mais à l'époque des essais nucléaires atmosphériques une certaine quantité de radionucléides se sont aussi déposés sur des îles voisines, notamment sur l'atoll de Tureia. On a donc mesuré les niveaux d'activité sur cet atoll afin de calculer les débits de dose actuels à ses habitants.*

Dans le cadre de la campagne d'échantillonnage et de surveillance terrestres, quelque 300 échantillons (végétation, noix de coco, sable, couche superficielle du sol, coraux, carottes de la dalle corallienne et aérosols) ont été prélevés et analysés dans dix laboratoires de neuf pays et au Laboratoire de l'AIEA à Seibersdorf. Ces échantillons ont fait l'objet de plus de 1 000 radio-analyses. En outre, on a procédé à de nombreuses mesures par spectrométrie gamma, en particulier sur le motu Colette à la pointe nord de Mururoa, près de l'endroit où les cinq expériences de sécurité atmosphériques avaient été réalisées (c'est-à-dire sur les motu Colette, Ariel et Vesta). On a également examiné du sable, du corail et des échantillons de la dalle corallienne provenant de cette zone en vue d'y déceler la présence de particules contenant du plutonium résiduel.

➤ *La campagne d'échantillonnage et de surveillance aquatiques a duré quatre semaines et a été effectuée à partir de cinq navires. Des levés du fond marin ont été établis par spectrométrie gamma en vue d'optimiser l'échantillonnage. Plus de 300 échantillons (d'eau des lagons, d'eau océanique, d'eau interstitielle présente dans les sédiments, de sédiments, de coraux et du milieu biologique) ont été prélevés. Environ 13 000 litres d'eau et une tonne d'échantillons solides ont été collectés, traités, emballés et transportés à Monaco pour être répartis entre les laboratoires d'analyse.*

Une campagne distincte d'échantillonnage des eaux souterraines a été menée à Mururoa et à Fangataufa en mai-juin 1997. Des échantillons ont été prélevés dans deux cavités-cheminées d'expérimentation à Mururoa et dans neuf forages de surveillance effectués dans les roches carbonatées.

➤ *La campagne d'échantillonnage des eaux souterraines a permis de vérifier de manière indépendante la validité des hypothèses faites pour estimer les concentrations des radionucléides dans l'eau des cavités-cheminées en comparant les estimations de l'étude avec les concentrations effectivement mesurées dans l'eau des deux cavités-cheminées résultant des essais nucléaires Céto et Aristée (sous la*

²⁷ Rapport succinct page 19

couronne de Mururoa). Des échantillons d'eau ont été recueillis dans les cavités-cheminées en juin 1997 par des participants à l'étude. »

2.2. L'évaluation des conditions radiologiques actuelles

Les campagnes faites dans le cadre de l'étude ont confirmé les nombreuses données déjà disponibles et fourni de nombreuses indications scientifiques supplémentaires.

« Les concentrations des radionucléides dans les milieux terrestre et aquatique sont généralement faibles et comparables aux concentrations signalées pour les mêmes radionucléides sur des atolls analogues où aucun essai d'arme nucléaire n'a eu lieu »²⁸.

L'AIEA résume ainsi ses observations et constats sur ce point :

« En résumé : l'Etude a permis de constater que les milieux terrestre et aquatique de Mururoa et de Fangataufa qui sont accessibles aux personnes contiennent des matières radioactives résiduelles attribuables aux "expériences nucléaires", mais généralement à des concentrations très faibles qui, selon les conclusions de l'Etude, sont sans importance du point de vue radiologique. Il convient toutefois de relever un certain nombre d'éléments dont les incidences radiologiques sont examinées dans la section "Cas méritant d'être considérés à part":

a) Plusieurs kilogrammes de plutonium résultant des essais nucléaires atmosphériques effectués sur les atolls subsistent dans les sédiments du lagon de chaque atoll. Une partie du plutonium présent dans les sédiments du lagon de Mururoa provenait des expériences de sécurité atmosphériques;

b) On a constaté que les concentrations de tritium dans chaque lagon étaient plus élevées que dans l'océan à cause de fuites provenant d'un certain nombre de cavités-cheminées créées par des essais nucléaires souterrains;

c) Des particules contenant du plutonium et de petites quantités d'américium résultant des expériences de sécurité atmosphériques subsistent dans la zone des sites des expériences, à savoir les motu Colette, Ariel et Vesta à Mururoa. Dans le cadre de l'Etude, on a analysé ces types de particules, qui ont été décelées dans des échantillons de sable et de corail recueillis à la surface du motu Colette et dans du sable prélevé dans un banc de sable adjacent à ce motu;

d) Des niveaux de ¹³⁷Cs supérieurs à la normale ont été décelés sur de petites surfaces représentant au total plusieurs hectares dans le secteur Kilo-Empereur de la couronne de Fangataufa.

²⁸ Rapport succinct page 20

2.3. L'évaluation des conditions radiologiques futures.

La méthodologie retenue s'analyse en quatre étapes d'évaluation précisées ci-après²⁹ :

« L'évaluation des conditions radiologiques futures a comporté quatre grandes étapes. L'étape initiale a consisté à évaluer l'énergie de chaque essai nucléaire souterrain en vue de déterminer l'activité de l'ensemble des radionucléides qui se trouvent actuellement dans le sous-sol de Mururoa et de Fangataufa dans les matières radioactives résiduelles produites par chaque essai nucléaire. C'est ce qui a été appelé le " terme source radioactif " .

La deuxième étape a consisté à évaluer le taux auquel les radionucléides présents dans chaque cavité-cheminée d'expérimentation nucléaire pourraient s'échapper dans les lagons ou directement dans l'océan en fonction du temps. Pour ce faire, on a d'abord estimé la concentration de chaque radionucléide dissous dans l'eau saline remplissant chaque cavité-cheminée, puis modélisé la vitesse de migration des matières dissoutes à travers les roches volcaniques environnantes et les roches carbonatées jusque dans les lagons ou directement dans l'océan. Le taux de relâchement des matières radioactives à partir des atolls— appelé le " terme source effectif " — variera avec le temps suivant la période radioactive des différents radionucléides et le ralentissement que chacun d'eux subira en traversant les roches volcaniques et la couche carbonatée avant d'arriver à la surface. Pour déterminer le terme source effectif, on a commencé par calculer la concentration des radionucléides dans l'eau remplissant les cavités-cheminées, que l'on a appelée le "terme source en solution".

La troisième étape a consisté à utiliser le terme source effectif pour modéliser la dispersion des matières relâchées dans le Pacifique Sud et pour calculer les concentrations futures des radionucléides importants du point de vue radiologique en un certain nombre de sites choisis du Pacifique Sud à différents moments à l'avenir — jusqu'à 100 000 ans dans le cas du plutonium.

La dernière étape de l'évaluation a consisté à estimer les débits de dose auxquels seraient exposés des groupes de population critiques dans les lieux et aux moments pour lesquels les concentrations futures de radionucléides avaient été calculées. »

La présentation des sept catégories d'essais et d'expériences nucléaires pour illustrer la modélisation du transport des radionucléides dans la géosphère est donnée par la figure 3 en annexe 4.

²⁹ Rapport succinct page 23

Sources souterraines : les sept catégories d'essais et d'expériences

« (Pour l'évaluation des taux de relâchement totaux de radionucléides à partir de toutes les sources souterraines)

On ne disposait pas, pour l'Etude, d'informations concernant l'emplacement précis et la profondeur de chaque essai, en sorte qu'il n'a pas été possible de calculer le taux de relâchement dû à chacune des 149 sources. Une telle précision aurait été de toute façon superflue; on est parvenu à un degré d'exactitude suffisant en classant les sources souterraines présentant des caractéristiques similaires en sept catégories et en évaluant les taux de relâchement associés à chaque catégorie de sources. Les sources comprennent les résidus de l'ensemble des essais souterrains, y compris, dans le cas de Mururoa, les expériences de sécurité et deux puits de stockage de déchets, ce qui donne 139 sources pour Mururoa et dix pour Fangataufa.

- 1) Un total de 121 essais "normaux" pour lesquels l'épaisseur de la couverture volcanique à peu près indemne au-dessus de la cavité -cheminée d'expérimentation a été suffisante pour assurer un bon confinement.*
- 2) Quatre essais avec une épaisseur de roche apparemment suffisante mais des dégradations de la couverture de roches volcaniques ("essais à couverture inadéquate").*
- 3) Douze essais dont la cavité-cheminée a atteint le toit du volcanisme ("essais à CATV").*
- 4) Trois expériences de sécurité effectuées à au moins 280 m de profondeur dans les roches carbonatées qui ont libéré une (très faible) énergie de fission.*
- 5) Quatre expériences de sécurité effectuées à au moins 280 m de profondeur dans les carbonates, pour lesquelles il n'y a pas eu libération d'énergie de fission.*
- 6) Trois expériences de sécurité effectuées dans les roches volcaniques sans libération d'énergie de fission.*
- 7) Deux puits de stockage pour déchets contenant du plutonium forés à 180 m de profondeur dans les roches volcaniques sous la couronne de Mururoa près de Denise, qui renferment chacun 3,7 kg de plutonium. »*

« L'Etude a permis d'estimer le taux de migration des radionucléides des matières radioactives produites par les essais nucléaires souterrains depuis les cavités-cheminées vers les lagons et directement vers l'océan à travers les milieux géologiques au cours de périodes supérieures à 100 000 ans³⁰.

Elle a permis de constater qu'au cours des premières dizaines d'années la majeure partie des radionucléides relâchés proviendraient d'un petit nombre de sites d'essais nucléaires souterrains où le confinement des essais nucléaires assuré par le soubassement volcanique situé au-dessus du point zéro a été inadéquat. En termes de quantités d'activité, le tritium prédominerait dans les premiers relâchements, mais avec des activités volumiques qui sont sans importance du point de vue radiologique. D'autres radionucléides, dont ^{137}Cs et ^{90}Sr , seraient retenus efficacement sous terre dans le soubassement volcanique et perdraient la majeure partie de leur activité par décroissance, et seules de faibles quantités de radionucléides seraient relâchées. Le relâchement du plutonium se poursuivrait à long terme, mais à des taux très faibles. D'après les prévisions fournies par la modélisation, il est improbable que les concentrations de ^{137}Cs et de $^{239}+^{240}\text{Pu}$ dans l'eau des lagons excèdent les niveaux actuels à un moment quelconque à l'avenir. Les concentrations de ^{90}Sr et de ^3H pourraient éventuellement dépasser légèrement les niveaux actuels, mais seulement pendant les quelques décennies à venir.

Les résultats de l'Etude en ce qui concerne l'évolution des concentrations ont un certain nombre de conséquences importantes:

- a) Les concentrations de ^{137}Cs et de $^{239}+^{240}\text{Pu}$ dans les eaux lagonaires ont peu de chances de dépasser les niveaux actuels à un moment quelconque à l'avenir.
- b) Les concentrations de ^{90}Sr pourraient dépasser légèrement les niveaux actuels (spécialement dans le lagon de Fangataufa), mais seulement pendant quelques dizaines d'années.
- c) Les concentrations de tritium dans les lagons pourraient rester assez constantes au cours des quelques dizaines d'années à venir avant de diminuer lentement.
- d) On peut valablement utiliser les données actuelles pour estimer les débits de dose maximums aux populations hypothétiques des atolls à l'avenir, étant donné que les concentrations des radionucléides importants au point de vue radiologique ne seront, en principe, jamais dépassées à l'avenir.
- e) Des quatre radionucléides étudiés, seul $^{239}+^{240}\text{Pu}$ est présent à des concentrations nettement supérieures aux niveaux océaniques dus aux retombées mondiales.
- f) Les concentrations de radionucléides anthropiques dans les lagons sont très faibles et généralement bien inférieures à celles des radionucléides naturels dans l'océan, pour lequel les valeurs typiques sont de 12 000 Bq/m³ pour ^{40}K et de 80 Bq/m³ pour les isotopes de l'uranium »

³⁰ Rapport succinct page 32

Recherchant une exhaustivité des hypothèses scientifiques imaginables, le CCI a envisagé « un certain nombre d'événements extrêmes » dont certains pourraient être dus à des changements climatiques : ainsi la glaciation entraînant une baisse du niveau de l'océan de plusieurs dizaines de mètres, entre autres. La Commission géomécanique internationale a envisagé de telles hypothèses de son côté. L'accroissement du taux de relâchement de matières radioactives en serait accru, notamment par le biais des cavités-cheminées. Une seule de ces hypothèses a toutefois été étudiée³¹ :

« Le seul événement disruptif dont on a jugé dans l'Etude qu'il méritait d'être évalué de manière approfondie a été le détachement et le glissement hypothétique d'une masse importante de roches carbonatées dans la zone nord de Mururoa, là où ont été effectués les expériences de sécurité souterraines et certains des essais nucléaires ayant produit des cavités-cheminées qui ont pénétré dans les formations carbonatées. Si un tel événement extrême hypothétique devait se produire, les courants océaniques entraîneraient les matières radioactives relâchées en les éloignant de Mururoa, en sorte que ce sont les habitants d'atolls proches qui recevraient la dose annuelle potentielle la plus élevée. Dans le cas des habitants de Tureia, la dose reçue au cours de la première année qui suivrait un tel glissement ne serait pas supérieure à quelques millièmes de millisievert, ce qui correspond à une fraction extrêmement faible (quelques parties par millier) de la dose annuelle due au fond de rayonnement que les habitants recevront inévitablement du fait des sources naturelles de rayonnements — même si l'on part de l'hypothèse pessimiste que tout le plutonium en jeu dans ce glissement entrerait en solution ».

➤ Résultats de la modélisation océanographique

« Pour l'Etude, on a utilisé des modèles océanographiques du champ régional et du champ lointain en vue d'estimer les concentrations dans l'eau de mer, en des lieux et à des moments différents, de radionucléides relâchés dans l'océan à partir de Mururoa et de Fangataufa. L'Etude a permis de constater qu'à l'exception de celles qui résulteraient d'un événement disruptif extrême hypothétique (cf. supra) les concentrations de radionucléides prévues à long terme tombent aux niveaux ambiants dans l'océan au-delà d'une centaine de kilomètres des atolls; ainsi, à Tureia, les concentrations prévues seront voisines des niveaux ambiants et sans importance du point de vue radiologique ».

2.4. Doses estimées dues aux matières radioactives résiduelles

« L'Etude a comporté une estimation des débits de dose à des groupes critiques dues à l'exposition aux radionucléides résiduels provenant des essais nucléaires français, actuellement et aux lieux et dates dans l'avenir pour lesquels les concentrations de radionucléides avaient été calculées. Les débits de dose ont été

³¹ Rapport succinct page 37

estimés pour des populations hypothétiques de Mururoa et de Fangataufa qui se nourriront principalement de produits de la mer et de la terre locaux ».

➤ Une population hypothétique installée sur les deux atolls et « se nourrissant de produits de l'agriculture et de la pêche dans les lagons ne sera pas, de manière générale, exposée à des doses attribuables à la radioactivité résiduelle dépassant 0.01 mSv par an, soit l'équivalent d'une très petite fraction (moins de la 200^{ème} partie) de la dose totale à laquelle cette population résidente serait inévitablement exposée du fait des sources de rayonnements naturelles³² ».

➤ « Les doses annuelles actuelles aux habitants d'autres îles du Pacifique Sud que les deux atolls attribuables à la radioactivité résiduelle dans l'environnement accessible ont aussi été estimées. Environ 5 000 personnes vivent dans un rayon de 1 000 km autour de Mururoa. On a estimé dans le cadre de l'Etude que les habitants de l'atoll de Tureia, qui est la terre habitée la plus proche de Mururoa et de Fangataufa (environ 130 km de Mururoa, et 120 habitants), ne reçoivent que des doses négligeables (moins de 0,0001 mSv par an) du fait de la radioactivité résiduelle à Mururoa et à Fangataufa même.

L'atoll de Tureia a toutefois reçu à l'époque quelques retombées dues aux essais nucléaires atmosphériques effectués à Mururoa et à Fangataufa, en plus des retombées mondiales. Les doses actuellement reçues par les habitants de l'atoll résultant de toutes les retombées antérieures ont été estimées à environ 0,005 mSv par an. Encore une fois, la fraction de cette dose qui est due aux retombées des seuls essais effectués à Mururoa et à Fangataufa est indéterminée, puisque les estimations de doses sont fondées sur les concentrations mesurées du total des radionucléides anthropiques présents dans l'environnement, qui incluront une certaine contribution attribuable aux retombées mondiales. La dose de 0,005 mSv par an est très faible comparée aux doses totales que les habitants de Tureia reçoivent des sources naturelles de rayonnements, et du même ordre que la dose calculée pour une population hypothétique de l'atoll de Mururoa ».

➤ Les doses estimées aux populations dans l'avenir

Le rapport succinct précise dans les termes suivants les perspectives auxquelles l'ensemble des analyses et projections précitées permettent au CCI de conclure :

« Doses qu'entraîneront à l'avenir les matières radioactives résiduelles se trouvant actuellement dans le milieu accessible.

Les doses annuelles estimées à toute population hypothétique future à Mururoa et Fangataufa dues à la dispersion générale dans l'environnement des radionucléides provenant d'essais nucléaires sont faibles en termes absolus et insignifiantes

³² Rapport succinct page 42

par rapport à tout critère ou autre terme de comparaison existants Des doses de rayonnement dues aux matières radioactives déjà présentes dans le milieu accessible — imputables principalement à ^{137}Cs et $^{239}+^{240}\text{Pu}$ — continueront d'être reçues mais diminueront, en raison à la fois de la décroissance radioactive et d'autres processus réduisant la disponibilité de ces radionucléides dans l'environnement.

Selon les prévisions de l'Etude, le taux de lixiviation de ^{137}Cs , ^{90}Sr et $^{239}+^{240}\text{Pu}$ présents dans les sédiments des lagons (qui sont responsables des niveaux actuels de ces radionucléides dans l'eau lagonaire) continuera à décroître avec le temps, tout comme les doses de rayonnement estimées qui sont associées à ces radionucléides. Les doses futures hypothétiques estimées dues aux sources existantes à Mururoa, si les atolls sont effectivement habités, descendront d'abord sur 100 ans de leur maximum actuel qui ne dépasse pas 0,01 mSv par an à environ 0,001 mSv par an à mesure que les matières radioactives résiduelles à la surface se désintègrent et se dispersent. (Il faut noter que ces doses augmenteront dans l'avenir éloigné lorsque le plutonium aura migré à partir du sous-sol et atteint le lagon, mais elles ne dépasseront jamais les doses actuelles.)

En résumé: Les doses de rayonnements dues aux matières radioactives résiduelles déjà présentes dans l'environnement accessible — principalement à ^{137}Cs et aux isotopes du plutonium — continueront d'être reçues, mais elles diminueront en raison à la fois de la décroissance radioactive et d'autres processus réduisant la disponibilité de ces radionucléides dans l'environnement. Selon les estimations de l'Etude, le taux de lixiviation du ^{137}Cs et des isotopes du plutonium présents dans les sédiments des lagons continuera à décroître avec le temps, tout comme les doses de rayonnements estimées qui sont associées à ces radionucléides. L'Etude a permis de constater que les doses annuelles potentielles estimées les plus élevées qui sont attribuables aux matières radioactives résiduelles déjà présentes dans l'environnement accessible de Mururoa et de Fangataufa et dans les eaux environnantes tomberont de leur maximum hypothétique actuel, qui ne dépasse pas 0,01 mSv par an, à environ 0,001 mSv par an d'ici 100 ans.

Exposition potentielle dans l'avenir due aux matières radioactives résiduelles

Sauf pour la population hypothétique, mentionnée précédemment, qui se nourrirait exclusivement de denrées produites sur de petites surfaces dans le secteur Kilo-Empereur de la couronne de Fangataufa, aucun groupe n'est susceptible, à un moment futur quelconque, de recevoir une dose attribuable aux matières radioactives résiduelles présentes à Mururoa et à Fangataufa qui soit supérieure à environ 1 % de la dose que ce groupe recevra inévitablement du fait des sources naturelles de rayonnements.

Aucune population ne recevra, à un moment futur quelconque, de doses sensiblement supérieures aux très faibles doses actuelles dues, à Tureia, aux relâchements de matières radioactives dans l'océan à partir de Mururoa et de Fangataufa (à savoir moins de 0,0001 mSv par an), sauf à la suite d'un événement disruptif postulé, comme indiqué ci-après.

Exposition potentielle d'habitants de la région due à des événements disruptifs postulés

L'Etude a analysé les conséquences radiologiques d'événements disruptifs postulés susceptibles d'amener au jour des matières radioactives, tels qu'ils ont été décrits précédemment dans la section "Evénements disruptifs hypothétiques". Ces derniers comprenaient une glaciation et un glissement de roches carbonatées entraînant un relâchement de radionucléides dans l'océan. Après un tel glissement, c'est pour les personnes résidant sur les îles proches que les doses annuelles hypothétiques seraient les plus élevées, étant donné que les radionucléides ainsi relâchés seraient entraînés par les courants océaniques. Dans le cas des personnes résidant à Tureia, la dose consécutive à un tel glissement de roches ne dépasserait pas, au cours de la première année, quelques millièmes de millisievert, même dans l'hypothèse très pessimiste où tout le plutonium en jeu dans ce glissement entrerait en solution. Les doses ultérieures diminueraient progressivement avec la dispersion de l'activité.

En résumé: L'Etude a permis de constater qu'à l'exception de la situation hypothétique examinée précédemment, aucun groupe de population n'est susceptible, à un moment futur quelconque, de recevoir une dose attribuable aux matières radioactives résiduelles présentes à Mururoa et à Fangataufa qui soit supérieure à environ 1 % de la dose due au fond de rayonnement que ce groupe recevra inévitablement du fait des sources naturelles de rayonnements ».

Mise en perspective des résultats de l'étude : données comparatives sur les doses

Les doses que l'on reçoit inévitablement en raison de la présence universelle de sources naturelles de rayonnements, comme les rayons cosmiques et les radionucléides naturellement présents dans la croûte terrestre, sont un repère utile pour mettre en perspective les doses provenant des matières radioactives résiduelles.

La dose moyenne mondiale (dose effective annuelle) due aux sources naturelles est estimée à 2,4 mSv, dont environ la moitié par exposition au radon dans l'air et à ses produits de désintégration. Il y a toutefois des différences importantes: la plupart des personnes reçoivent une dose effective annuelle due aux sources naturelles se situant entre 1 et 20 mSv, avec parfois des niveaux élevés dépassant 100 mSv en certains endroits. Tout individu reçoit une dose d'exposition due au rayonnement naturel d'au moins 1 mSv par an. (Voir le tableau X.)

TABEAU X. DOSES EFFECTIVES ANNUELLES AUX ADULTES DUES AUX SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENTS

Source d'exposition	Dose globale moyenne (mSv)	Exemples types de doses supérieures à la moyenne (mSv)
Rayons cosmiques	0,39	2,0
Rayonnement terrestre gamma	0,46	4,3
Radionucléides dans l'organisme (sans le radon)	0,23	0,6
Radon et produits de désintégration du radon	1,3	10
Total (arrondi)	2,4	20

La dose annuelle estimée due au fond naturel de rayonnement pour des personnes habitant les deux atolls, si elles ont les habitudes et le comportement pris comme base pour les calculs de l'Etude, serait d'environ 1,4-3,0 mSv. Une proportion importante de la dose est due à l'incorporation des radionucléides naturels ^{210}Po et ^{210}Pb présents dans le poisson et d'autres produits de la mer. (Voir le tableau XI et la figure 25.)

TABEAU XI. DOSES EFFECTIVES ANNUELLES MOYENNES DUES AUX SOURCES NATURELLES: ATOLL DE MURUROA

Source d'exposition	Dose annuelle moyenne à Mururoa: Anémone (mSv)
Rayonnement externe naturel	0,27
^{40}K naturel (dans l'organisme)	0,18
^{210}Po + ^{210}Pb naturels	0,9-2,5 ^a
Total	1,4-3,0

^a Selon les niveaux naturels de ^{210}Po dans le poisson.

Il est également intéressant de noter que les voyages par avion entraînent des doses aux passagers qui sont plus élevées que les doses estimées dues aux essais nucléaires présentées ici. Par exemple, un vol de quatre heures aux latitudes tempérées entrainera une dose de 0,015-0,02 mSv en raison des niveaux plus élevés du rayonnement cosmique en altitude. Si le trajet du vol passe par le pôle Nord ou le pôle Sud, la dose pourra être jusqu'à deux fois supérieure.

On aura encore un repère supplémentaire pour juger de l'importance des doses de rayonnements présentées ici en considérant l'actuel système de protection radiologique, qui est utilisé pour maintenir à des niveaux acceptables les doses dues à des opérations programmées. La limite de dose annuelle (additionnelle) pour les membres du public recommandée dans les Normes fondamentales internationales est de 1,0 mSv en sus de la dose due au fond naturel de rayonnement. Cette limite s'applique uniquement aux doses totales supplémentaires résultant d'activités bénéfiques qui mettent en jeu des radionucléides, et elle ne s'applique pas au fond naturel de rayonnement. De plus, les Normes fondamentales internationales établissent que les pratiques donnant lieu à des doses annuelles maximums ne dépassant pas environ 0,01 mSv peuvent être exemptées de la plupart des exigences réglementaires étant donné que ces doses sont infimes.

Il convient de noter toutefois que les prescriptions des Normes fondamentales internationales qui sont applicables à la situation radiologique des atolls de Mururoa et Fangataufa sont celles relatives aux interventions: celles-ci font l'objet des précisions données dans l'encadré 14. Les doses estimées dans le cadre de l'Etude et les doses dues au fond naturel de rayonnement sont comparées dans le tableau XII et la figure 26.

TABEAU XII. COMPARAISON DES DOSES DE RAYONNEMENT (mSv par an)

Source d'exposition	Dose (mSv par an)
1) Doses globales dues au fond naturel de rayonnement:	
• Intervalle représentatif	1-10
• Maximum	~ 100
• Moyenne	2,4
2) Mururoa et Fangataufa: dose due au fond naturel de rayonnement	1,4-3
3) Estimations des doses supplémentaires actuelles dues aux matières radioactives résiduelles qui subsistent à Mururoa et à Fangataufa:	
• Maximum à Tureia	< 0,0001
• Moyenne à Mururoa et à Fangataufa	< 0,01
• Maximum dans le secteur Kilo-Empereur de Fangataufa	~ 0,25
4) Dose supplémentaire maximum à Tureia à la suite d'un glissement de roches à Mururoa (première année)	0,007
5) Valeur recommandée par l'AIEA pour les mesures correctives (Normes fondamentales internationales)	10

Conclusions et recommandations du Comité consultatif international de l'AIEA

Conclusions

Incidences pour la santé humaine

L'Etude a permis de conclure 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 présentes à Mururoa et à Fangataufa.

Il a toutefois été noté dans l'Etude que l'incidence signalée du cancer dans les populations de la région du Pacifique Sud et dans le monde entier évolue pour diverses raisons, et notamment à cause de l'amélioration du diagnostic et de l'enregistrement des cas de cancer; de modifications de l'exposition aux agents cancérogènes dans le milieu ainsi que des habitudes individuelles (comme les habitudes alimentaires et tabagiques); des migrations de population qui modifient les taux de référence pour l'incidence du cancer; et de changements dans l'incidence d'autres maladies. Il est cependant souligné dans l'Etude qu'aux très faibles niveaux de doses estimés dans celle-ci il n'y aura aucune modification des taux d'incidence du cancer dans la région qui soit attribuable à l'exposition aux rayonnements provoquée par les matières radioactives résiduelles présentes à Mururoa et à Fangataufa.

Incidences pour le milieu biologique

L'Etude a permis d'évaluer les débits de dose au milieu biologique indigène résultant des matières radioactives résiduelles présentes à Mururoa et à Fangataufa et, dans la grande majorité des cas, il a été constaté qu'ils étaient analogues ou inférieurs aux débits de dose dus aux sources naturelles de rayonnements. Une exception à cela est constituée par les débits de dose potentiellement élevés auxquels pourraient être exposés des individus de certaines espèces du fait du plutonium contenu dans des particules — provenant, par exemple, des sédiments du banc de sable adjacent au motu Colette dans la partie nord de l'atoll de Mururoa. L'Etude a permis de conclure que, dans l'ensemble, les débits de dose de rayonnements et les modes d'exposition attendus sont tels qu'ils ne pourraient avoir aucun effet sur des groupes de population du biotope, bien que des individus des espèces puissent occasionnellement subir un détrimement, mais pas

au point que cela mette en péril l'ensemble de l'espèce ou crée des déséquilibres entre les espèces.

Mesures correctives

Etant donné les niveaux d'activité mesurés et prévus de radionucléides et les faibles niveaux de doses estimés pour le présent et pour l'avenir, et compte tenu des recommandations internationales, l'Etude a permis de conclure qu'aucune mesure corrective n'est nécessaire à Mururoa et à Fangataufa pour des raisons de protection radiologique, que ce soit maintenant ou à l'avenir.

Surveillance

De même, l'Etude a permis de conclure qu'il n'est pas nécessaire de poursuivre la surveillance de l'environnement de Mururoa et de Fangataufa à des fins de protection radiologique.

Solidité des conclusions

Bien que de nombreuses hypothèses aient été faites pour la modélisation des systèmes, les résultats sont solides, c'est-à-dire que l'Etude a permis de conclure que l'ampleur escomptée des changements dans les conclusions du fait des incertitudes sur les paramètres utilisés dans la modélisation est faible. En outre, les doses prévues sont si faibles que des erreurs importantes (même d'un ordre de grandeur) n'influeraient pas sur les conclusions.

Recommandation

Il a été noté dans l'Etude qu'un programme scientifique de surveillance des concentrations des radionucléides dans les formations carbonatées et dans les cavités-cheminées des essais nucléaires est en cours à Mururoa et à Fangataufa. Au cas où ce programme serait poursuivi, il est recommandé que l'accent soit mis sur la surveillance du comportement migratoire des radionucléides et des radiocolloïdes à longue période et relativement mobiles en raison de l'intérêt scientifique particulier qu'il présente. Ce programme scientifique, complété par 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 ».

* * *

*

L'étude du Comité consultatif international de l'AIEA illustre une expertise qui constitue, combinée sur un point précis avec les travaux de la Commission géomécanique internationale, un modèle d'exhaustivité et de rigueur, appuyée sur une information particulièrement ouverte de la part des autorités françaises, s'agissant d'un site d'essais militaires. Les conclusions n'en sont que plus incontestables pour un site qui avait déjà fait l'objet d'autres expertises et dont les résultats avaient déjà dessiné un diagnostic très ressemblant à celui-ci.

Il a lieu de rappeler ici que c'est la France qui avait demandé spontanément que soient faites ces deux études, lesquelles ont été réalisées, comme on a pu le noter, non seulement en toute indépendance mais encore avec la fourniture d'un grand nombre d'éléments d'informations scientifiques réunies pour ces travaux, outre tout ce qui avait déjà été communiqué précédemment. La liste donnée en annexe des membres et des consultants de ces deux instances scientifiques internationales, (y compris ceux venant de pays hostiles aux essais français), spécialement constituées pour traiter l'ensemble des questions, permet de confirmer que les deux atolls sont bien les sites les plus auscultés de la planète.

La remise en cause de ces conclusions ne relèverait plus que du harcèlement de principe.

V – L'expertise à la recherche de conséquences sanitaires

Ainsi que cela a été précisé précédemment, la recherche d'une sécurité maximale a permis dès les débuts du CEP (Centre d'Expérimentation du Pacifique), la mise en place d'une organisation assurant une surveillance étendue de l'environnement et donc d'une manière permanente des retombées et des paramètres dans tous les milieux naturels.

S'agissant des personnels participant aux activités du CEP, quel que soit leur statut, leur fonction, leur origine, leur durée de séjour sur les sites d'expérimentation, ils ont fait l'objet d'un suivi médical et bien entendu dosimétrique qui a permis de prendre la mesure des incidences à leur sujet lesquelles se sont révélées inexistantes, cela sera détaillé dans un premier point.

Le suivi sanitaire des populations de Polynésie française fera l'objet d'un second point. On y présentera les éléments caractérisant la situation sanitaire des populations à partir des analyses et des études réalisées notamment depuis l'établissement du registre des cancers en Polynésie. Les études épidémiologiques les plus précises, dont certaines sont en cours, doivent être bien distinguées du suivi sanitaire en général. En outre, les caractéristiques bien particulières de la région, au premier rang desquelles l'extrême étroitesse des effectifs en jeu, doivent rester présentes à l'esprit pour apprécier les résultats de ces travaux.

1. Les personnels participant aux activités du CEP

Alors que la première période des essais nucléaires dans le monde, notamment à travers les tirs atmosphériques, a mobilisé d'importants effectifs progressivement, lors des passages aux stades suivants il a été fait appel aux différents personnels en nombre beaucoup plus réduit. Les progrès technologiques et les contraintes budgétaires figurent dans les pays occidentaux, parmi les facteurs qui y ont largement contribué, de même que le choix de nouveaux sites qui ne permettaient pas aisément de toute façon le déploiement des effectifs antérieurs.

Cela s'observe avec netteté pour la France. On a compté environ 24 000 personnes sur les sites du Sahara avec 17 essais en six ans alors que pour le CEP en Polynésie on en comptait 57 750 pour 210 essais en 30 ans. En 1990, par exemple, on relevait la présence sur l'ensemble des sites du CEP de 1500 militaires, 600 personnels civils métropolitains (CEA et entreprises) et 1000 personnels civils recrutés localement.

1.1. Le suivi médical courant

Quelles que soient les différentes catégories de personnel, un suivi médical courant a été constamment assuré notamment à travers l'application de l'ensemble des dispositions nationales générales, spécifiques et locales (cf. supra).

Concernant le personnel recruté localement et pour l'ensemble de la période (1966-1996), on a relevé vingt cas de maladies professionnelles reconnues, le plus souvent liées aux activités de génie civil : 5 conjonctivites du ciment, 5 cas de gale du ciment, 2 surdités par travaux sonores.

On a eu à déplorer pendant toute la période un seul accident en juillet 1979 : il s'agissait d'une explosion chimique de vapeurs d'acétate lors de la décontamination d'un bunker (« Meknès ») dédié à des expériences de physique ; cet accident a fait deux morts et deux blessés.

1.2. Le suivi dosimétrique

Pour l'ensemble des sites (Mururoa et Fangataufa) et leurs annexes (l'atoll de Hao par exemple), 250 000 dosimètres ont été distribués ; 57 750 personnes ayant participé aux expérimentations ont été surveillées par la mise en œuvre d'une dosimétrie individuelle et collective.

On présentera d'abord la dosimétrie externe, la plus significative pour les personnels, puis la dosimétrie interne en distinguant à chaque fois la période des essais atmosphériques et celle des essais souterrains.

➤ La dosimétrie externe

Sur les 52 750 personnes affectées sur l'ensemble des sites pendant les **essais atmosphériques**, 93,5 % ont reçu une dose nulle ; seules 3 425 (6,5 %) ont reçu des doses mesurables.

Le nombre de doses ayant dépassé la « norme annuelle travailleur » de 50 mSv s'est élevé à sept. Dans quatre cas il s'agissait des pilotes d'avions chargés des pénétrations dans le nuage radioactif consécutif au tir pour des doses de 180 mSv, 120 mSv, 60 mSv et 51 mSv, ce qui les situe dans le domaine des expositions exceptionnelles concertées, la première étant légèrement supérieure à la limite. Dans deux autres cas, il s'agissait d'activités extérieures aux essais nucléaires avec deux médecins ayant eu une exposition lors d'examens radiologiques (60 et 54 mSv).

La plupart des autres personnels classés catégorie A a reçu dans sa majeure partie des doses inférieures à la norme « personnes du public » (soit 5 mSv) : seules 55 personnes ont atteint la valeur de 15 mSv.

Le groupe le moins exposé était constitué par les Polynésiens recrutés localement. Ainsi, pour un effectif de 4 701, on a relevé 4 461 doses nulles (95 %) et 240 (5 %) doses de 0,20 à 5 mSv, aucune n'atteignant ce seuil.

Pour **les essais souterrains** (1975-1996), 5 000 personnes ont fait l'objet d'un suivi dosimétrique : aucune n'a atteint la limite travailleur catégorie A et on ne relève que 16 doses comprises entre 5 et 25 mSv.

La diminution considérable des effectifs nécessaires par rapport aux essais atmosphériques et les caractéristiques des techniques mises en œuvre pour réaliser ce type d'expérimentations explique le très faible nombre de personnes exposées à un risque radiologique. Il s'agissait des personnels assurant le montage des édifices, le post-forage et la décontamination de l'ensemble des matériels de forage.

Pour tous les autres personnels, l'exposition a été nulle ou inférieure à 5 mSv. Enfin, au cours de la période du moratoire (1992-juin 1995) et lors de la dernière série de tirs souterrains (septembre 1995-janvier 1996), aucune dose n'a été relevée pour les personnels sur les sites.

➤ La dosimétrie interne

Les essais atmosphériques

La recherche d'une éventuelle contamination interne s'effectuait par des examens d'anthropo-spectro-gammamétrie et de radiotoxicologie des excréta. En outre, un contrôle systématique était également pratiqué lors de l'arrivée et du départ de chaque personne affectée sur les sites.

De 1966 à 1974, on a relevé 6 cas de contamination interne significative, aucun n'ayant entraîné un dépassement de la limite normative des travailleurs.

Les essais souterrains

Les risques à prendre en compte durant cette période étaient de deux ordres : celui dû à la présence éventuelle d'iode radioactif lors des post-forages et celui dû à la présence de plutonium sur les chantiers de nettoyage et décontamination mis en œuvre au Nord de l'atoll de Mururoa. Un seul cas de contamination interne significative a été relevé : un dépassement de la norme de l'ordre du double.

En ce qui concerne les personnels recrutés localement, on constate là aussi une très faible exposition. Les deux types d'examens pratiqués ont mis en évidence l'absence de dose engagée significative.

La recherche d'une sécurité maximale et le soin rigoureux mis en œuvre dans la surveillance dosimétrique de tous les personnels confirme sans ambages l'absence d'incidence sur la santé pour des effectifs importants pendant une période de trente années. Au total, les doses collectives relevées s'élèvent à 8,9 homme.Sv.

2. Suivi sanitaire des populations

La faiblesse numérique relative de la population de Polynésie française (220 000 dont 192 000 natifs du Territoire selon le recensement de 1996) mais surtout son extrême éparpillement sur une superficie immense, permettent difficilement d'appréhender des situations variées, sur de tout petits effectifs et qui en outre ont pu très rapidement évoluer en raison des changements de mode de vie, alimentation notamment, et de la prise en charge médicale qui s'est très fortement améliorée avec la fin de l'isolement pour nombre d'atolls liée entre autres à l'activité du CEP.

A côté de l'extension de la couverture médicale des populations, la connaissance de la situation sanitaire s'est imposée comme un impératif qui est à l'origine d'études épidémiologiques fines. La recherche d'un éventuel lien entre les pathologies examinées avec les incidences des essais nucléaires atmosphériques est souvent l'objectif ou en tout cas la toile de fond de ces études.

2.1. Le registre des cancers de Polynésie française

La faiblesse des statistiques sanitaires a incité à créer un outil de référence en 1983 avec le registre des cancers. Dans bien des cas jusque là et encore au début des années quatre-vingts, la cause de la mort n'était pas

mentionnée dans les actes de décès (21 % pour les îles de la Société, et jusqu'à 62 % aux Tuamotou et aux Gambier). On estime que l'on identifiait à l'époque à peine la moitié des cas. En outre, pour nombre de cancers dont les traitements exigent des moyens lourds n'existant pas en Polynésie, il est assez souvent procédé à des transferts sanitaires vers la métropole, plus rarement vers la Nouvelle-Zélande, ce qui complique encore davantage le suivi épidémiologique. Il était donc peu envisageable de procéder à des recherches fines pour connaître par exemple le cancer primitif par rapport à la pathologie apparente.

La Commission du Pacifique Sud avait prescrit en 1979 à ses membres la création d'un tel registre aux pays membres. A partir de 1988, où a pu notamment être réalisée la fusion des fichiers préexistants, la couverture de la population par le registre des cancers de Polynésie française, est devenue tout à fait satisfaisante.

Ce taux a ainsi été estimé à 90 % en 1990 par des consultants américains (Université de Californie du Sud et celle de Hawaï).

Les outils que constituent les registres des cancers qui ont pu être créés dans le Pacifique à l'instar de celui de la Polynésie ont permis de mener des études épidémiologiques comportant des comparaisons avec des groupes similaires. Ainsi, compte tenu des origines ethniques communes, les résultats observés pour les populations de Polynésie sont souvent comparés à ceux obtenus pour les populations mahories de Nouvelle-Zélande et celles de Hawaï.

2.2. Les études épidémiologiques

➤ Depuis 1994, plusieurs études ont été réalisées sur les cancers en Polynésie française. La structure au sein de laquelle elles sont principalement menées est l'unité de recherches en épidémiologie des cancers de l'INSERM et plus spécialement le « groupe de recherches sur les effets cancérigènes des radiations ionisantes » dirigé par M. Florent de Vathaire. L'OPRI (Office de Protection contre les rayonnements ionisants) participe également à ces études, de même que l'Institut Gustave Roussy de Villejuif et les partenaires sur place : centre hospitalier territorial de Mamao à Papeete, Institut de recherche pour le développement à Arue (Tahiti), Direction de la santé à Papeete.

Le principe de ces études est de réaliser un bilan des occurrences et de la répartition des différents types de cancers en fonction du sexe, de l'âge et de la résidence ce qui pouvait permettre, notamment, de constater l'absence ou la présence de liens entre certains cancers et les essais atmosphériques. Dans un cadre plus large de suivi sanitaire, l'objectif est d'identifier et de connaître la répartition des pathologies cancéreuses les plus fréquentes.

➤ Trois études qui ont donné lieu à des publications récentes sur des aspects essentiels :

- *L'incidence des cancers en Polynésie française entre 1985 et 1995*³³. Une première étude sur la mortalité par cancer en Polynésie française de 1984 à 1992 s'était révélée peu conclusive en raison des incertitudes sur les causes de mortalité, notamment pour le début de la période.

- *Le cancer de la thyroïde en Polynésie française entre 1985 et 1995 : influence des essais nucléaires atmosphériques effectués à Mururoa et à Fangataufa entre 1966 et 1974*³⁴.

- *Incidences des hémopathies malignes (leucémies) en Polynésie française entre 1990 et 1995*³⁵.

Il convient de rappeler quelques données factuelles nécessaires pour remettre en perspective les résultats de ces études. La population moyenne pour la période 1985 – 1995 a été estimée à 168 500 habitants nés et résidant en Polynésie française et ainsi répartis selon la résidence :

- 85 % dans l'archipel de la Société,
- 7 % dans les Tuamotou et les Gambier,
- 4 % aux Marquises et
- 4 % aux îles australes.

➤ Sur les 2863 cas incidents de cancers diagnostiqués sur la période, 76 % ont été histologiquement validés et pour les 677 non validés, 338 figuraient déjà sur le registre du Territoire.

- L'incidence annuelle brute des cancers est plus élevée chez la femme (167 pour 10⁵) que chez l'homme (143 pour 10⁵).

³³ Incidence des cancers en Polynésie Française entre 1985 et 1995 :

- Béatrice Le Vu – Institut Curie, Paris, France
- Florent de Vathaire – Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM), Institut Gustave Roussy, Villejuif, France
- Cécile Challeton de Vathaire – Office de la Protection contre les Rayonnements Ionisants (OPRI), Le Vésinet, France
- John Paofaite – Institut de Recherche pour le Développement, Arue, Tahiti, Polynésie Française
- Laurent Roda – Centre Hospitalier Territorial Mamao, Papeete, Tahiti, Polynésie Française
- François Lhoumau et François Laudon – Direction de la Santé, Papeete, Tahiti, Polynésie Française

(in Tropical Medicine and International Health – Volume 5, n° 10, pages 722 à 731, octobre 2000)

³⁴ Florent de Vathaire, Béatrice Le Vu et Cécile Challeton de Vathaire (in Cancer causes and control, Kluwer Academic Publishers 2000)

³⁵ Laurent Roda, Florent de Vathaire, Bernard Rio, Agnès Le Tourneau, Patrice Petididier, François Laudon, Robert Zittoun (in Leukemia Research 23 (1999). Pergamon-Elsevier Science Ltd)

- Les localisations de cancer les plus fréquentes sont chez la femme : le sein, le col de l'utérus, l'appareil digestif, le poumon et la thyroïde, chez l'homme : le poumon, l'appareil digestif, la prostate et la cavité buccale.

L'étude sur l'incidence des cancers précise en outre : « L'incidence standardisée tous cancers confondus a augmenté significativement chez la femme de la période 1985 – 1989 à la période 1990-1995, mais elle est restée stable chez l'homme. L'incidence des cancers du sein et de la thyroïde chez la femme, des cancers de la prostate chez l'homme, a augmenté significativement entre ces deux périodes. En revanche, l'incidence des cancers du larynx et des myélomes multiples a diminué significativement chez l'homme entre 1985-1989 et 1990-1995.

L'incidence globale des cancers en Polynésie Française sur la période 1985-1995 était similaire à celle observée chez les Hawaïiens pour la période 1987-1992, mais plus faible que chez les Maoris pour la même période » (de 25 %).

Dans la partie « discussion » de l'étude, il est ainsi indiqué : « Le résultat principal de cette étude est la faible incidence en Polynésie française, chez les deux sexes, des cancers de l'estomac, du côlon et du rectum, et du tube digestif (tous types confondus) comparée à celle observée chez les Hawaïiens et les Maoris : l'incidence standardisée sur la population mondiale est respectivement de 6,6 9,9 et 19,8 pour 10^5 par an chez la femme et 9,9 12,9 et 29,2 pour 10^5 par an chez l'homme. Bien que les cancers soient traditionnellement fortement associés au régime alimentaire, il ne faut pas exclure la possibilité d'une prédisposition génétique ».

L'incidence des cancers du tube digestif est trois fois inférieure à celle observée chez les deux populations de référence (Hawaïiens et Maoris de Nouvelle-Zélande) ; en revanche, l'incidence des cancers du pharynx, du larynx et de la thyroïde est approximativement deux fois plus élevés.

Ces constatations de l'étude précitée peuvent être rapprochées des données publiées en janvier 1998 par l'Observatoire Polynésien de la Santé (Ministère de la Santé du Territoire) :

« Les cancers les plus fréquents en Polynésie sont les cancers du poumon et de la prostate chez l'homme, les cancers du sein, du poumon, du col utérin et de la thyroïde chez la femme. L'incidence du cancer du poumon chez les hommes est du même ordre en Polynésie (52,6 pour 100 000) qu'en France (52,8) : chez les femmes, l'incidence du cancer pulmonaire en Polynésie (25,5) est près de six fois plus élevée qu'en France (4,8), constatation en accord avec l'importance du tabagisme féminin soulignée par différentes études. L'incidence du cancer de la prostate est au même niveau en Polynésie et en France (30,4 et 31,1). L'incidence du cancer du sein observée chez les femmes en Polynésie

(57,1) est très proche, bien qu'un peu inférieure, de l'incidence estimée en métropole (65,4). L'incidence du cancer du col est deux fois plus élevée en Polynésie qu'en France, et l'incidence du cancer de la thyroïde chez les femmes près de cinq fois plus. Pour ce dernier cancer, cette incidence élevée est retrouvée chez les mélanésiennes de Nouvelle-Calédonie (avec des taux supérieurs) et les hawaïennes d'Hawaii ; les facteurs qui expliquent cette fréquence élevée du cancer de la thyroïde chez les femmes dans le Pacifique restent encore mal compris. L'incidence des cancers digestifs (colon-rectum) reste actuellement inférieure de 2 (chez les femmes) à 3 fois (chez les hommes) en Polynésie par rapport à la France ».

L'un des objectifs de l'étude « Incidence des cancers en Polynésie Française » a consisté à analyser l'évolution et la répartition de tumeurs susceptibles d'être radio-induites.

➤ Les leucémies

Les auteurs de l'étude sur les hémopathies malignes en Polynésie française concluent qu'« ils n'ont pas constaté d'incidence accrue des leucémies (tous types moins les leucémies lymphoïdes chroniques) en Polynésie française par rapport à celle observée chez les Maoris de Nouvelle-Zélande ou chez les Hawaïens pour la période 1988-1992. Ces résultats restent inchangés lorsqu'on restreint la comparaison aux patients natifs de Polynésie dont 94 % sont Maoris ou à moitié Maoris. Ces résultats viennent confirmer une précédente analyse de mortalité par cancer concluent qu'il n'y avait pas plus de décès par leucémies et par lymphomes chez les natifs de Polynésie française que chez les Maoris de Nouvelle-Zélande ou les Hawaïens ».

S'agissant des leucémies diagnostiquées chez les moins de 25 ans (étude sur 1985-1995), il a été relevé que de tels diagnostics ont été plus nombreux entre 1985 et 1989. Cette constatation ne se corrobore pas avec un lien géographique quelconque (éloignement ou non du site d'essais, qu'il s'agisse du lieu de naissance ou de résidence). D'autre part, les dates de naissance correspondantes sont pour 90 % postérieures à 1975 ; ces deux constatations contribuent à éliminer tout lien avec une exposition potentielle lors des essais atmosphériques.

➤ Etude de la population âgée de moins de 25 ans lors des essais atmosphériques.

Les Polynésiens nés entre 1950 et 1975 avaient entre 10 et 45 ans pendant la période analysée. L'analyse des cancers dans ces tranches d'âge doit prendre en compte deux points particuliers :

- la plus grande partie des cancers survient au-delà de cette tranche d'âge, c'est-à-dire que l'on doit s'attendre au cours des prochaines années, du fait

du vieillissement de la population, à une augmentation régulière de la fréquence des cancers ;

- certains de ces cancers (thyroïde, sein, col de l'utérus, colon) peuvent être dépistés précocement et les variations du taux de ces cancers doivent tenir compte des variations de l'âge au diagnostic qui dépend largement de la qualité de la surveillance médicale.

- Les variations d'incidence entre 1985-89 d'une part et 1990-95 d'autre part sont similaires aux résultats de la totalité de la cohorte avec une augmentation d'incidence portant sur les cancers de la thyroïde chez la femme sans que soit analysée la variable « âge au diagnostic ».

- Les taux de cancers sont comparés, entre autres, à ceux des habitants de Hawaii et de Nouvelle-Zélande, considérés comme des populations ayant de fortes similitudes. On constate cependant des différences d'incidence non expliquées pour certains types de cancers, en particulier chez la femme (pharynx et thyroïde plus fréquents, cancers digestifs, du sein, moins fréquents en Polynésie française).

➤ Les cancers de la thyroïde

- L'étude spécifique précitée sur les cancers de la thyroïde montre nettement une incidence plus élevée de cette pathologie avec 153 cas pour l'ensemble de la période. Ce sont les femmes qui en sont plus particulièrement victimes avec un doublement de la fréquence entre 1985-1990 (39 cas) et 1991-1995 (81 cas), le nombre total pour les hommes s'élève à 34.

- La répartition en classes d'âge n'est pas significative puisque sur les 118 cas féminins, 69 sont ceux de femmes nées avant 1950, qui n'ont donc pas été exposées à d'éventuelles retombées pendant leur enfance ou leur adolescence et 49 en revanche sont nées après cette date et donc susceptibles d'avoir subi des retombées.

- Se référant à l'épidémiologie des cancers radioinduits, il apparaît que la radio-sensibilité est d'autant plus forte que l'âge d'exposition est plus faible, le maximum de sensibilité visant les filles de moins de un an³⁶. Or les 49 cas de cancers thyroïdiens survenus dans le deuxième groupe (femmes nées entre 1950 et 1975) montrent qu'il n'y a pas de cancer diagnostiqué chez l'enfant. Parmi les cas relevés chez des femmes résidant ou nées dans les Tuamotou-Gambier, qui sont au nombre de 4, ce qui est évidemment élevé rapporté à la population, un seul concerne une femme née en 1965, juste avant le début des essais atmosphériques, les autres ayant au moins 6 ans à cette date. La proportion

³⁶ L'irradiation de la thyroïde augmente le risque de cancer de la thyroïde en particulier chez l'enfant et l'adolescent : le facteur d'augmentation du risque est de 80 % pour une dose de 1000 mSv, les filles sont deux à trois fois plus sensibles que les garçons. Le risque devient faible vers l'âge adulte et disparaît vers 35 ans.

de cancer de la thyroïde parmi les femmes est apparue nettement moins élevée pour les populations plus lointaines de Mururoa avec 42 cas pour celles vivant à plus de 1000 km (essentiellement Tahiti, compte tenu de son poids démographique).

- Le ratio standardisé d'incidence par rapport aux deux populations de référence (Maoris de Nouvelle-Zélande et Hawaïiens) s'établit à 2,4 pour l'ensemble des personnes (les deux sexes) du premier groupe (nées avant 1950) et à 2,2 pour le deuxième groupe c'est-à-dire dans tous les cas à plus du double. Cette observation doit toutefois être modulée en fonction de plusieurs éléments d'incertitude dont le plus important est sans doute celui de la normalisation du seuil d'enregistrement des cas de cancers de la thyroïde.

Les auteurs de l'étude générale (« Incidence des cancers en Polynésie Française ») indiquent eux-mêmes dans la partie « discussion » : *« toute interprétation de cette différence est à proscrire en l'absence de procédures standardisées d'enregistrement des cas de cancer. Nos constatations peuvent être dues à notre choix d'un seuil de 5 millimètres pour ce cancer, alors que les registres d'Hawaï et de Nouvelle-Zélande s'en remettent aux jugements des praticiens et des pathologistes. En fait, une telle comparaison pourrait être effectuée en procédant à un ajustement des procédures de diagnostic et de la distribution des stades de tumeur au moment du diagnostic pour chaque pays. Le Pacifique est connu comme étant une zone à haut risque pour les cancers de la thyroïde (Henderson 1985). Les taux les plus élevés de cancer de la thyroïde ayant fait l'objet d'une publication ont été constatés en Nouvelle-Calédonie sur la période 1985-1992 : 34 pour 10⁵ par an chez les femmes mélanésiennes (Ballivet 1995) ».*

En outre, d'autres facteurs tels que la consommation alimentaire d'iode par les fruits de mer, une prédisposition génétique, ou l'excès de poids peuvent expliquer des différences d'incidences de cancers de la thyroïde. Enfin sous l'angle de la méthodologie, on sait que les études doivent être menées sur des populations d'autant plus nombreuses que le risque auxquelles elles sont confrontées est faible. A titre de référence, le NRPB Britannique (National Radiological Protection Board) a calculé qu'il faut 600 000 personnes ayant reçu en une seule fois une dose de 200 mSv, en les suivant pendant vingt ans, pour mettre en évidence une augmentation de 5 % du nombre de cas de cancers. Or, même la personne la plus exposée parmi le personnel pendant les essais atmosphériques avec 180 mSv (pilote de *Vautour* chargé de la pénétration du nuage) n'a pas atteint ce seuil.

Les auteurs de l'étude spécifique précisent eux-mêmes au sujet des calculs d'incidence différentielle par rapport aux deux groupes de référence qu'un excès induit par contamination radioactive devrait se traduire par un nombre minimal de cas de 83 et non 59 pour le deuxième groupe ; ils concluent le résumé de cette étude par les observations suivantes :

« Etant donné que la différence entre les populations polynésiennes et les populations de référence n'était pas plus importante pour les Polynésiens encore enfants lors des essais que pour les Polynésiens nés antérieurement, comme l'on s'y serait attendu dans le cas d'une contamination à l'iode radioactif, les taux élevés de cancers de la thyroïde en Polynésie française peuvent difficilement être attribués aux retombées d'iode radioactif. Néanmoins, une surveillance de la population née près de Mururoa est nécessaire afin de confirmer ou de nier l'existence d'un risque plus élevé de cancers de la thyroïde au sein de cette population ».

Cette observation nous paraît être la seule conclusion envisageable pour le seul élément notable qui ait pu être trouvé à travers un important suivi sanitaire et un nombre remarquable d'études épidémiologiques, surtout si on le rapporte au nombre d'habitants et à l'état sanitaire plutôt satisfaisant de ceux-ci.

Cette appréciation et l'ensemble des constatations et des comparaisons faites montrent la nécessité de poursuivre la recherche sur les facteurs de risque de cancers de la thyroïde en Polynésie française et sur ce seul point, la pérennité du registre des cancers en Polynésie, élément statistique de base, devant être assurée.

En effet, autant la réalisation d'autres études relèverait d'un superflu coûteux, autant la réponse à cette interrogation scientifique et médicale doit être recherchée, la méthodologie dont on dispose et les éléments de référence extérieurs (populations témoins) devraient permettre d'atteindre cet objectif.

* * *
*

Achevant ainsi l'examen des incidences et de la situation du centre d'expérimentations du Pacifique, on peut mettre en perspective la situation radiologique de Mururoa (où il n'y a pas et il n'y a pas eu d'habitants) et qui reste surveillée en permanence avec le soin et les moyens indiqués, avec d'autres sites d'essais :

- à Mururoa, la dose annuelle liée aux essais est de 0,01 mSv/an (soit 1/200 de l'exposition naturelle moyenne),
- sur l'île de Bikini, elle est de 15 mSv/an (1500 fois plus)
- sur le site de Semipalatinsk, elle est de 140 mSv/an (14 000 fois plus).

LES ESSAIS NUCLEAIRES AMERICAINS

Les 1054 essais nucléaires³⁷ (dont 24 conjointement avec le Royaume-Uni) effectués par les Etats-Unis se sont répartis sur de nombreux sites extrêmement différents tant d'un point de vue géographique et géologique qu'au regard de l'éloignement des zones habitées. Le choix des différents sites est lié à l'évolution des techniques de tir, de leur puissance, avec en regard la recherche de limitations des risques et des nuisances, objectif qui s'est accentué au fil des années. En outre, il convient de garder à l'esprit que les Américains ont été, et de beaucoup, les premiers à expérimenter l'arme nucléaire, ce qui peut contribuer à expliquer à la fois les insuffisances du début et les performances de la suite.

Les incidents et un accident ont également marqué la première période du fonctionnement du site de l'atoll de Bikini : la série Crossroad (1946) et surtout le tir Bravo (1954). Les contaminations qui ont pu être engendrées à partir du site du Nevada constituent, quant à elles, une révélation tardive d'une autre nature.

Enfin, malgré l'effort d'information fait d'une manière spectaculaire depuis une huitaine d'années par les autorités américaines, on ne dispose d'aucun élément concret sur certaines expérimentations réalisées dans l'océan Pacifique et les tirs dans l'Atlantique sud (haute altitude).

Les essais nucléaires américains (sur lesquels des éléments détaillés sont donnés en annexe) se répartissent ainsi par types et par sites :

Essais atmosphériques (par type)

Tir par canon	1
Tir par avion	52
Tir sous ballon	25
Tir sur barge	36
Tir par missile	12
Tir à la surface	28
Tir sur tour	56
Total	210

³⁷ Nombre communiqué par le Department of Energy des Etats-Unis en décembre 2000 et auquel correspond le chiffre de 1149 « détonations » selon cette même source. L'UNSCEAR, quant à elle, a retenu précédemment le chiffre de 1127 essais.

Essais souterrains

Puits	763 *
Galeries (tunnels)	67
Cratères	9
Total	839
* dont 24 tirs conjoints avec le Royaume-Uni	

Essais sous-marins

Total	5
--------------	----------

Il s'agit là pour ces essais sous-marins de tirs qui ne sont pas souterrains, même s'ils ont pu être effectués à quelques dizaine de mètres sous le fond marin.

Site d'essais du Nevada

Tirs atmosphériques	100
Tirs souterrains	828 *
Total	928
* dont 24 tirs conjoints avec le Royaume-Uni	

Iles Marshall (tirs atmosphériques)

Bikini	23
Enewetak	43
Total	66

Autres sites dans l'Océan pacifique (tirs atmosphériques)

Christmas Island	24
Johnston	12
Autres non précisés	4
Total	40

Autres sites (atmosphériques et aériens)

Alamogordo ³⁸	1
Amchitka, Alaska ³⁹	3
Carlsbad, Nouveau Mexique	1
Central Nevada	1
Fallon, Nevada	1
Farmington, Nouveau Mexique	1
Grand Valley, Colorado	1
Hattiesburg, Mississippi	2
Nellis Air Force Range	5
Rifle, Colorado	1
Total	17

A cela s'ajoutent 3 tirs par missile effectués dans l'Atlantique Sud.

L'évaluation de l'impact local et régional des essais nucléaires ne peut se faire, ici comme pour les autres puissances, que par site, chacun ayant non seulement ses caractéristiques spécifiques mais encore une histoire propre marquée par le niveau technique atteint au moment où les essais ont été réalisés sur chaque site.

Le cas des essais souterrains sera évoqué à la lumière des informations plus limitées dont on dispose.

I - Les îles Marshall (Bikini et Enewetak)

Le territoire des îles Marshall est devenu en 1946 un site d'essais nucléaires et ce, jusqu'en 1958, alors que concurremment des essais atmosphériques ont été menés en même temps sur d'autres sites (Nevada à partir de 1951, autres îles du Pacifique). Les deux atolls où ont eu lieu les essais ont été Enewetak (43 tirs avec une puissance cumulée de 32 mégatonnes de TNT) et Bikini (23 tirs avec une puissance de 77 mégatonnes).

³⁸ Premier essai de bombe atomique le 16 juillet 1945

³⁹ Dont le tir souterrain le plus puissant réalisé par les Etats-Unis

1. Les faits

1.1. Enewetak

➤ Les tirs

Alors que deux premiers essais américains d'après-guerre ont eu lieu à Bikini en juin/juillet 1946, Enewetak est choisi comme second site d'essais aux îles Marshall en décembre 1947 ; ses 145 habitants sont évacués en avril 1948 et installés sur l'atoll d'Ujelong, distant de 250 km environ.

Les premiers essais ont lieu en avril et mai 1948 (3 tirs). Trois années se passent avant la deuxième série (4 tirs en 1951). On compte ensuite deux tirs en 1952 (dont une bombe de 10,4 Mt), un tir en 1954 et ce n'est qu'en 1956 et 1958 qu'un grand nombre de tirs auront lieu (respectivement 11 et 21), le dernier sur ce site en août 1958.

En 1948 et 1951, tous les tirs sont effectués sur une tour, technique qui laisse progressivement la place aux tirs sur barge ou en surface, dans deux cas, par avion, et dans deux cas, sous l'eau.

A trois exceptions près, tous les tirs ont eu lieu entre la mi-avril et la mi-août.

➤ Les conséquences

En 1972, une enquête radiologique a été réalisée par la Commission de l'Energie Atomique des Etats-Unis (AEC) en vue d'engager les travaux préalables au retour des habitants.

D'après les résultats de cette enquête, il apparaissait que les habitants de la partie Sud de l'atoll d'Enewetak pourraient revenir y vivre, ce qui n'était pas le cas de la partie Nord. Après la décontamination et le réaménagement de l'atoll réalisés de 1977 à 1979, la partie Sud a été réhabilitée. De nouvelles mesures ont été effectuées à plusieurs reprises sur la partie Nord, notamment en 1979 et 1987 ; les niveaux de radioactivité mesurés ne permettent pas ici une réinstallation sans restrictions. Les doses sont essentiellement liées à l'ingestion de productions agricoles dont les teneurs en césium 137 dépasseraient les normes ; « *Le strontium 90 ainsi que les radionucléides transuraniens (plutonium 239 et 240 et américium) contribueraient relativement peu à la dose interne. L'irradiation externe de césium 137 déposée sur le sol constituerait la deuxième voie la plus importante d'exposition. L'inhalation, l'eau potable et les produits de la mer ne contribueraient que légèrement à la dose d'exposition*⁴⁰ ».

⁴⁰ Robinson et Al. 1996, cité par Scope (59) : Sir Frederick Warner et René J.C. Kirchmann Nuclear test explosions, Environmental and Human impacts (2000)

1.2. Bikini

a) L'ensemble des essais

Les 167 habitants de l'atoll sont évacués en mars 1946 et installés sur l'atoll de Rongerik, puis en 1948 sur l'île de Kwajalein, et enfin sur l'île de Kili ainsi que sur celle d'Ejit, loin de Bikini.

➤ Les deux premiers essais à Bikini («crossroads » en 1946) d'une puissance de 21 kt chacun ont eu lieu le premier par tir aérien, le second par tir sous-marin à une profondeur de 30 m sur des cibles constituées de navires de guerre.

Les militaires chargés de la décontamination sur les cibles sont intervenus rapidement après l'explosion et des doses excessives ont pu être reçues alors. Une étude réalisée, après une demande du Congrès en 1985, par le National Research Council⁴¹ cite une légère augmentation de la mortalité (toutes causes) chez les vétérans (+ 5 %) . En ce qui concerne la mortalité par cancer, les résultats ne sont pas significatifs, sachant par ailleurs que les participants n'étaient pas dotés de dosimètres individuels.

➤ Entre juillet 1946 et février 1954, il n'y a pas eu d'essai à Bikini. Après ceux de 1954, au nombre de cinq, du 28 février au 4 mai, deux autres séries ont eu lieu : en 1956 (6 tirs de mai à juin) et en 1958 (10 tirs à la même période). A l'exception d'un tir aérien (de 3,8 Mt, vraisemblablement à 200 km dans l'ouest de l'atoll), deux tirs ont été effectués en surface , tous les autres sur barge. Il n'y a pas eu d'accident entraînant une contamination accidentelle si l'on excepte le tir « Bravo ».

b) L'accident du tir « Bravo »

➤ Bombe thermonucléaire dont la puissance avait été prévue à 5Mt, le dispositif de ce tir (en surface) a explosé en fait à 15 Mt dans des conditions météorologiques mal appréciées en raison notamment d'un changement d'orientation des vents en altitude ; la pulvérisation du corail a entraîné la formation d'un aérosol (cendres blanches) dont l'activité était très élevée. L'ensemble des retombées radioactives ne se sont donc pas évacuées vers le Nord/Nord-Ouest mais vers l'Est et on a rapidement atteint plusieurs atolls habités à une distance de 150 à 250 km : Ailinginae et Rongelap (une centaine d'habitants) dans un délai de trois à six heures puis Rongerik (une trentaine de militaires) et enfin Utirik à 570 km où les 167 habitants subirent des retombées moindres mais peu repérables contrairement aux îles plus proches où les retombées ont « concrétisé » le phénomène sous forme de cendres (aspect de neige).

⁴¹ Johson et al. 1996, cité par Scope (59)

Les habitants des atolls furent évacués deux à trois jours après l'accident. On s'apercevra ultérieurement que d'autres îles, mais à un bien moindre degré, avaient été touchées.

Par ailleurs, les vingt-trois marins d'un chalutier japonais « *Dragon chanceux V* » qui se trouvaient à 190 km du point zéro subirent une pluie de cendres radioactives pendant plusieurs heures et gagnèrent leur port d'attache au Japon après douze jours de mer et purent enfin être pris en charge médicalement.

➤ Les conséquences sanitaires :

Les retombées sur les atolls de Rongelap, Ailingnae et Rongerik ainsi que sur les pêcheurs japonais ont eu comme conséquence des irradiations importantes responsables d'effets aigus se manifestant quelques jours après l'explosion chez plus de 250 personnes. Le passage du nuage et le dépôt de cendres radioactives a entraîné :

- une irradiation externe globale et une irradiation interne par inhalation et ingestion de radionucléides déposés par les cendres radioactives, se manifestant cliniquement par un syndrome aigu d'irradiation (perte de cellules sanguines, perte des phanères),
- une irradiation cutanée par le dépôt sur la peau de cendres radioactives, se manifestant par des brûlures,
- simultanément l'irradiation de la thyroïde par incorporation d'iode radioactif par inhalation ou ingestion, est à l'origine d'effets se manifestant plus tardivement, quelques mois ou années après par l'apparition d'hypothyroïdie, de nodules thyroïdiens bénins ou cancéreux. D'une manière générale, la gravité et la fréquence des effets décroît avec la distance.

Les doses moyennes par irradiation externe sont estimées à environ 1 Gy à Rongelap et Ailingnae et 10 fois moins, 0,1 Gy à Utirik.

Les doses à la thyroïde dépendent aussi de l'âge lors de l'exposition et les doses maximales sont reçues par les enfants de 1 an. Les doses moyennes à la thyroïde sont estimées à Rongelap à 10, 20 et 50 Gy respectivement chez l'adulte, l'enfant de 9 ans et l'enfant de 1 an, avec des valeurs maximales atteignant 50 Gy et 200 Gy chez les enfants de 9 ans et 1 an. Les doses estimées à Utirik sont environ 10 fois moindres.

Parmi les effets à court terme, on a relevé une légère augmentation des fausses-couches et des enfants morts-nés. On n'a pas relevé de cataractes radio-induites. Les dysfonctionnements de la thyroïde ont été le principal effet à moyen terme. Depuis 1966, la population qui a été exposée reçoit à vie une thérapie de remplacement de la thyroxine dans la perspective de limiter le développement de

tumeurs malignes de la thyroïde. A ce sujet, on a relevé, parmi les 86 personnes les plus exposées, 23 nodules bénins et cinq cancers ; le taux de prévalence des nodules atteint 59 % des enfants qui avaient moins de dix ans lors de l'accident. Un cas de leucémie chez un jeune adulte exposé à 1900 mGy à l'âge de un an a été relevé.

➤ Les doses reçues par les pêcheurs japonais ont été estimées ainsi : irradiation externe globale de 2000 mGy à 6000 mGy, et pour la voie interne de 800 à 4500 mSv à la thyroïde pour l'ensemble des radionucléides. L'ensemble des examens cliniques et biologiques, de même que les pathologies ont corroboré ces estimations . Un marin est décédé plusieurs semaines après son retour, semble-t-il, d'une hépatite consécutive à l'une des nombreuses transfusions qu'il avait dû subir. La convalescence et la guérison ont duré deux ans. Dans les treize ans qui ont suivi, 36 enfants sont nés des membres de l'équipage.

1.3. Le retour dans les atolls contaminés lors du tir Bravo

Les habitants à Utirik se sont réinstallés dès le mois de juin 1954 dans leur atoll. Cela n'a été jugé possible pour ceux de Rongelap qu'en juin 1957 avec toutefois des restrictions quant aux îles de l'atoll et quant aux productions agricoles qui pourraient être obtenues.

Les doses résultant de la contamination résiduelle s'élevaient en effet pour la voie externe à 30mSv (20 à Utirik) pour la période de 20 ans à venir et pour la voie interne à 140 mSv (20 à Utirik). Plusieurs rapports gouvernementaux suscitèrent au début des années quatre-vingts l'inquiétude parmi les habitants de Rongelap. Certains conclurent que leur atoll pouvait être aussi contaminé que celui de Bikini. Aussi, en attendant le résultat d'une nouvelle expertise, ont-ils décidé eux-mêmes d'évacuer leur atoll en mai 1985 pour s'établir provisoirement sur l'île de Majatto (atoll de Kwajlein). La commission de la sécurité radiologique constituée au NRC (National Research Council) américain a communiqué les résultats de son expertise et le Congrès a adopté en 1998 l'enveloppe budgétaire de 45 millions de dollars permettant d'engager les travaux dont la durée prévue est de cinq ans. Les habitants de Rongelap, s'ils le désirent, devraient donc pouvoir s'installer à nouveau dans leur île dans un avenir proche.

Compte tenu de la nature des essais nucléaires réalisés, qui plus est à l'époque des techniques les plus risquées avec les tirs sur barge, la question de la réinstallation à Bikini de la population évacuée avant les tirs se posait dans de tout autres termes, même si la population était à peine plus nombreuse.

2. Bikini : le constat

Depuis que les essais se sont terminés en 1958, plusieurs études ont été effectuées sur les conditions radiologiques de l'atoll de Bikini.

Pendant des années, des avis divergents ont été donnés sur les possibilités de réinstallation sur l'atoll de Bikini. C'est la raison pour laquelle, selon les termes de l'AIEA, *« la République des îles Marshall –qui est devenue membre de l'AIEA- s'est tournée vers celle-ci pour obtenir confirmation de demander que les diverses évaluations sur l'état radiologique de l'atoll et les recommandations émises pour sa réhabilitation fassent l'objet d'un examen critique de la part d'experts du même domaine de compétence »*⁴².

Il convient en effet de rappeler qu'en 1968-69, les autorités américaines, sur la base de plusieurs enquêtes radiologiques, avaient déclaré que l'atoll de Bikini était sûr et qu'ainsi sa population pouvait s'y réinstaller. Après évacuation des débris et nettoyage en 1969, l'atoll a fait l'objet d'une nouvelle enquête confirmant les précédentes (AEC : Commission de l'Energie Atomique).

En 1970, plusieurs familles (quelques dizaines de personnes) revinrent d'abord sur l'île de Bikini, mais les habitants n'étaient pas convaincus par les conclusions de l'enquête.

En 1975, des mesures de routine puis des analyses montrèrent un niveau élevé de radioactivité ; les représentants de la population engagèrent alors une procédure contre le gouvernement américain demandant une étude radiologique exhaustive de l'ensemble de l'atoll et des autres atolls nord de l'archipel des îles Marshall. Les études et analyses qui suivirent jusqu'en 1978 à Bikini (comportant notamment des examens radio-anthropométriques des personnes) montrèrent que la dose de césium 137 contenue dans les noix de coco notamment dépassait, et de beaucoup, les normes en vigueur et il y avait eu une croissance du décuple de ce radionucléide parmi les habitants réinstallés à Bikini ayant un régime alimentaire comprenant essentiellement les productions locales.

Les mesures dans différents échantillons de l'environnement indiquent que 90 % de la dose reçue par quelqu'un résidant sur l'atoll de Bikini est due au césium 137, pour l'essentiel apporté par l'alimentation. Les doses estimées pour les résidents de Bikini entre 1971 et 1978 diffèrent donc selon leur type d'alimentation. La dose maximale est apportée par une alimentation exclusivement locale et estimée à 15 mSv/an (et 560 mSv/70 ans) ; la dose correspondant à une alimentation mixte, locale et d'importation conduit à une dose de 4 mSv/an (et 150 mSv/70 ans).

⁴² Rapport du groupe consultatif de l'AIEA 1998 (cf. infra)

Il fut ainsi décidé en septembre 1978 d'évacuer à nouveau l'ensemble des habitants (139) qui s'étaient réinstallés et ce, vers les mêmes îles que précédemment (Koli notamment).

3. Bilan global des îles Marshall et recommandations de l'AIEA

Une surveillance radiologique de Bikini et des dix autres atolls du Nord de l'archipel a été assurée à partir de 1978 jusqu'en 1995.

Les Etats-Unis, outre les mesures d'indemnisation et de compensation qu'ils adoptèrent pour la population de Bikini, établirent une « commission de réhabilitation de l'atoll de Bikini » qui, en 1984, constata notamment, dans son premier rapport, que l'île « *pouvait être à nouveau habitée pourvu que ne soient consommés ni des aliments produits sur place, ni d'eau de la nappe phréatique* ».

Sous l'angle institutionnel, l'accord de libre association entre la République des îles Marshall et les Etats-Unis a été signé en janvier 1986. Il prévoit le paiement de compensations pour les habitants des atolls de Bikini, Rongelap, Enewetak et Utirik, un fonds complémentaire spécifique est par ailleurs prévu pour décontamination et le réaménagement ultérieur de l'atoll de Bikini lui-même. Ces mesures complètent celles déjà prises depuis 1977, notamment pour les personnes et plus particulièrement pour les habitants de Rongelap et l'Utirik atteints par les retombées du tir Bravo (victimes de cancer de la thyroïde et leurs ayant-droit notamment).

Une étude d'évaluation radiologique demandée par le Gouvernement des îles Marshall, et vérifiée par un groupe d'experts internationaux, achevée en 1995, confirma les précédentes mesures et analyses. Les autorités prirent acte de ces résultats mais saisirent l'AIEA (cf. supra) pour obtenir une nouvelle confirmation.

C'est dans ce cadre que le groupe consultatif international de l'AIEA engagea ses travaux en décembre 1995 et publia en mars 1998 son rapport intitulé : « *Conditions radiologiques de l'atoll de Bikini : perspectives pour une réinstallation* »⁴³.

⁴³ Aux termes du rapport lui-même, l'examen international poursuivait un triple objectif :
« - Evaluer les conditions radiologiques sur l'atoll de Bikini en République des îles Marshall, en tenant compte des informations transmises par le gouvernement de la République.
- Vérifier s'il est ou non nécessaire de confirmer les informations disponibles sur l'état radiologique actuel de l'atoll.
- Déterminer s'il est ou non nécessaire d'intervenir pour prendre des mesures curatives aux fins de protection contre les radiations et, dans l'affirmative, la nature, l'étendue et la durée d'une pareille intervention ».

Il est précisé dans le sommaire du rapport que :

« L'objectif premier de cet examen critique était d'aider la population de Bikini à se faire sa propre idée sur l'état radiologique de l'atoll et sur les perspectives de son repeuplement, si tel était le souhait de ses habitants (...) »

A la demande des autorités des îles Marshall, l'examen international a été limité à l'atoll de Bikini et n'a pas porté sur les autres atolls, îles et îlots, touchés par les retombées radioactives produites par les essais. Qui plus est sur l'atoll de Bikini, l'examen n'a porté que sur l'île du même nom, où la population résidait à l'origine.

L'examen concerne les conditions radiologiques existantes et leurs implications pour l'habitabilité future de l'atoll. Il n'a pas vocation à intégrer le bilan rétrospectif de l'impact radiologique passé des essais nucléaires ».

Conclusions et recommandations du rapport de l'AIEA

« 1. En vertu du nombre et de la qualité des informations scientifiques sur les radionucléides résiduels issus des essais d'armements nucléaires réalisés sur l'atoll de Bikini, soumises aux fins de l'examen, les conclusions sont les suivantes : (...)

Il est inutile de faire procéder à une nouvelle confirmation, par des experts indépendants, des mesures et des évaluations effectuées sur l'atoll de Bikini...

La population de Bikini pourrait être rassurée sur l'état radiologique réel de l'atoll par un programme limité de contrôle des niveaux de radiation, ce qui impliquerait la participation de certains membres de la population locale.

2. Au vu des informations soumises et dans l'hypothèse où la population de Bikini déciderait de retourner s'installer sur l'île de Bikini (principale île habitée de l'atoll), la conclusion est la suivante :

Le repeuplement permanent de l'île de Bikini, dans les conditions radiologiques actuelles, sans que soient prises des mesures de protection, n'est pas recommandé compte tenu des doses de rayonnements qui pourraient potentiellement être reçues par les habitants soumis à un régime alimentaire constitué de denrées entièrement d'origine locale.

Cette conclusion se fonde sur l'idée qu'un régime alimentaire constitué entièrement de denrées alimentaires produites sur place – qui contiendraient certaines quantités de radionucléides résiduels – pourrait conduire à ce qu'une hypothétique population de repeuplement soit exposée au rayonnement dû aux radionucléides résiduels encore présents sur l'île, et notamment le ¹³⁷Cs, ce qui induirait une valeur de dose efficace annuelle d'environ 15 mSv (voire de 17,4 mSv si l'on y ajoute le rayonnement ambiant naturel). On estime que ce niveau nécessite une quelconque intervention aux fins de protection contre le rayonnement.

3. Cependant, il y a lieu de considérer que :

En pratique, il est improbable que dans les conditions actuelles, la population soit effectivement exposée aux doses occasionnées par un régime alimentaire à base de produits locaux, étant donné que le régime alimentaire des habitants des îles Marshall est constitué – et continuera vraisemblablement de l'être dans un proche avenir – d'une importante proportion de denrées d'importation, dont on peut supposer qu'elles sont exemptes de radionucléides résiduels.

Néanmoins, l'hypothèse d'un régime alimentaire basé sur des denrées exclusivement d'origine locale a été retenue dans l'évaluation pour des raisons de prudence et de simplification et aussi, parce que le niveau actuel des importations alimentaires pourrait à terme diminuer.

4. Un certain nombre de stratégies environnementales directes ont été envisagées sur l'île de Bikini, lesquelles, à condition d'être correctement mises en œuvre, pourraient donner des résultats tout à fait satisfaisants du point de vue de la protection contre les rayonnements. La conclusion est donc la suivante :

L'île de Bikini pourrait être repeuplée de façon permanente à condition de prendre certaines mesures curatives.

5. Plusieurs remèdes possibles ont été envisagés, avec pour conséquence que les mesures ci-après ont été sélectionnées comme base pour une nouvelle évaluation :

- Application régulière d'engrais à base de potassium dans toutes les zones de l'île de Bikini susceptibles d'abriter des cultures alimentaires, accompagnée d'un enlèvement des terres autour et au-dessous des zones d'habitation et d'un remblaiement par du corail concassé (mesure dénommée stratégie curative de l'engrais au potassium).

- Décapage complet du couvert végétal de l'île de Bikini (mesure dénommée stratégie de décapage des sols).

Alors qu'aucune recommandation définitive n'est donnée sur la marche à suivre, la stratégie faisant appel à un engrais au potassium est considérée comme la solution privilégiée. (...)

6. En conclusion :

Les résultats escomptés d'une stratégie fondée sur l'application d'engrais au potassium sont conformes aux orientations internationales sur les interventions destinées à éviter des doses de rayonnements en cas d'exposition chronique : par conséquent, cette stratégie assurerait un environnement sain sur le plan radiologique, permettant une réinstallation rapide des habitants.

Selon les hypothèses retenues concernant le régime alimentaire, les doses effectives annuelles moyennes estimées diminueraient respectivement dans les proportions suivantes : d'environ 15 mSv (si l'on y ajoute la dose due au rayonnement ambiant naturel, la dose efficace annuelle est d'environ 17,4 mSv), pour un régime hautement calorique composé intégralement de denrées alimentaires d'origine locale, à 1,2 mSv environ (si l'on y ajoute la dose due au rayonnement ambiant naturel, la dose efficace annuelle est d'environ 3,6 mSv) ; et d'environ 4 mSv (si l'on y ajoute la dose due au rayonnement ambiant naturel, on obtient une dose efficace annuelle d'environ 6,4 mSv), pour un régime hautement

calorique composé de produits locaux et importés, à 0,4 mSv environ (si l'on y ajoute la dose due au rayonnement ambiant naturel, on obtient une dose efficace annuelle d'environ 2,8 mSv). Même dans l'hypothèse la plus prudente d'un régime hautement calorique uniquement à base de produits locaux, les doses en résultant seraient nettement inférieures au niveau d'action générique admissible pour une intervention. Les doses seraient quelque peu supérieures à celles inhérentes au rayonnement ambiant naturel auquel était exposée la population de l'île de Bikini, avant son évacuation et avant qu'il ne soit procédé aux essais nucléaires ; elles seraient également légèrement supérieures aux doses naturelles moyennes globales du milieu ambiant, mais inférieures au niveau d'ordinaire élevé des doses dues au rayonnement ambiant naturel dans le monde.

7. La conclusion est la suivante :

La stratégie alternative, i.e. la solution d'un décapage des sols – dont il est dit qu'elle est la stratégie privilégiée de la population de Bikini – serait très efficace pour éviter des doses dues aux radionucléides résiduels, mais elle pourrait avoir de sérieux effets néfastes sur l'environnement et sur le plan social.

Ces conséquences pourraient être graves car le couvert végétal fertile est le substrat des cultures de fruits, qui constituent la principale ressource alimentaire locale. Le remplacement du couvert végétal par des terres prélevées ailleurs constituerait une entreprise gigantesque, dont le coût serait très vraisemblablement prohibitif. En outre, il serait très probable que la concentration de radionucléides naturels dans n'importe quelle terre végétale continentale utilisée en remplacement soit plus élevée que celle des sols actuels.

8. En conclusion :

Il convient de ne proposer aucune action curative à ce stade pour des îles de l'atoll de Bikini autres que l'île de Bikini.

De tout temps, les autres îles de l'atoll n'ont jamais été habitées et ont été exploitées uniquement pour des visites occasionnelles et pour la pêche.

9. Dans l'hypothèse où la stratégie proposée serait mise en œuvre, il est recommandé de :

Procéder à des mesures périodiques de radioactivité dans les produits alimentaires d'origine locale afin d'évaluer l'efficacité des mesures prises. Il conviendrait de prévoir un appareil de contrôle intégral de l'organisme, simple de manipulation, ainsi qu'une formation à son utilisation, en tant que moyen supplémentaire permettant aux hypothétiques habitants d'être rassurés sur le fait que leur organisme n'a pas absorbé une dose significative de césium. »

4. Observation d'ensemble

Au-delà des indications précises relatives à Bikini sur le cadre et les objectifs de l'examen international dont l'AIEA a été chargée, il doit être remarqué que l'examen n'a porté que sur l'île de Bikini, précédemment habitée : la comparaison s'impose avec Mururoa et Fangataufa, atolls qui n'ont jamais été habités et où, par ailleurs, la situation radiologique est toute différente, ainsi que les conclusions et recommandations du rapport de l'AIEA en attestent.

Premier véritable site d'essais nucléaires au monde, où tous les tirs ont été atmosphériques alors que la technique du sous ballon n'avait pas encore été mise au point, le site des îles Marshall a logiquement été celui où les risques de retombées contaminantes, voire d'accident, devaient être les plus élevés. En outre, l'éloignement des îles habitées s'est révélé insuffisant, notamment par rapport à la maîtrise des technologies que l'on avait à l'époque.

Par ailleurs, l'appréciation des incidences ne s'est faite que très progressivement. Ainsi, les conséquences de l'accident du tir Bravo ont certes été appréhendées tout de suite pour les plus graves (les quatre atolls les plus proches de Bikini) mais bien des années après l'événement des retombées de moindre importance ont été établies pour des atolls plus lointains (Ailuk et Likiep principalement) principalement par une enquête du Department of Energy en 1978 et par l'ACHRE⁴⁴.

On peut remarquer enfin que les tirs pratiqués à Enewetak ne paraissent pas avoir eu des incidences aussi substantielles que ceux de Bikini, même si l'on fait abstraction de l'accident Bravo.

⁴⁴ ACHRE : Comité consultatif américain sur l'expérience des radiations sur l'homme institué par le Président CLINTON en 1994 dont le rapport a été publié à la fin de l'année 1995 (cf. infra)

II – Le site d’essais du Nevada (N.T.S)

1. Les faits

Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, cinq essais d’armes nucléaires ont été réalisés par les Etats-Unis jusqu’au seuil de l’année 1951, et ce, aux îles Marshall (dont deux à Bikini en 1946 et trois à Enewetak en 1948, aucun tir n’ayant eu lieu en 1947, 1949 et 1950).

A) Le choix du site

A la fin des années quarante lorsque l’arme atomique devient clairement une composante à part entière de la politique de défense américaine, et notamment après le tir de la première bombe atomique soviétique en août 1949, se posa la question du choix d’un site d’essais permettant de nombreux tirs dans des conditions logistiques abordables (proximité, temps et coût) et en tenant compte des exigences de sécurité.

De nombreux sites furent envisagés à travers le territoire continental des Etats-Unis, y compris l’Alaska. Les principaux critères étaient : une faible densité de population, la sécurité tant pour les retombées et l’effet de souffle que les conséquences thermiques, des conditions météorologiques favorables pendant la plus grande partie de l’année, une géologie favorable, une main-d’œuvre disponible et des moyens d’accès acceptables.

C’est ainsi que le secteur de la base aérienne de Nellis, au Nord-Ouest de Las Vegas dans l’Etat du Nevada, fut retenu pour des essais atomiques de relativement faible puissance. En effet, tous les tirs de forte, voire de moyenne puissance, ont eu lieu dans d’autres sites alors même que le NTS était déjà en service : aux îles Marshall, dans d’autres îles du Pacifique et d’autres sites encore, y compris l’Alaska pour les tirs souterrains. Il est à noter également que, à l’origine, le NTS a été choisi pour des essais atmosphériques, la plupart des essais souterrains y ont également été menés ainsi que les tirs de génie civil (y compris d’excavation).

Sur le plan géologique, la particularité de ce site qui est passé de 1800 km² à 3500 km² est de comporter principalement deux bassins orographiques fermés (Yucca flat et Frenchman flat).

De janvier 1951 à octobre 1958, 94 tirs nucléaires atmosphériques⁴⁵ ont eu lieu, auxquels s'ajoutèrent de mars à septembre 1962 six tirs (3 atmosphériques et 3 d'excavation, pour une puissance totale de 1,05 Mt, à rapprocher des 76 Mt de Bikini des 31 Mt d'Enewetak, des 20,8 Mt de l'atoll de Johnston et des 23,3 Mt de Christmas Island.

Au Nevada les tirs atmosphériques répartis sur une trentaine d'années ont donc été nombreux et très faibles en puissance mise en œuvre. On va observer que les retombées contaminantes paraissent avoir été sans commune mesure avec cette puissance.

B) Les techniques de tir

➤ Les techniques de tir

Les deux premières séries d'essais réalisés en 1951 et au début de 1952 ont été aériens entre 300 et 400 m d'altitude pour l'essentiel (13 contre 3 en surface). A partir de mai 1952 et jusqu'au milieu de l'année 1957, c'est la technique du tir sur tour (à 90 m d'altitude en général, quelquefois à 150 m voire 200 m) qui a prévalu. Ensuite, et jusqu'à la fin (octobre 1958), elle a progressivement cédé la place au tir sous ballon ; il s'agissait de ballons gonflés à l'hélium stabilisés à une altitude variant de 100 à 500 mètres.

➤ Lors de la reprise des essais atmosphériques américains , consécutive à la reprise par les Soviétiques le 1^{er} septembre 1961, le site du Nevada ne fut utilisé que pour un très petit nombre de tirs de surface ou de cratère, six au total, l'essentiel des tirs atmosphériques d'alors ayant lieu sur l'atoll de Johnston (10) et à Christmas Island (24). Il convient de signaler qu'après le dernier tir atmosphérique américain déclaré (4 novembre 1962 à Johnston, 20 kt par missile) auront encore lieu six essais de tir de cratère appelés « peaceful applications programm » de la série « Plowshare » plus ou moins comparables à ceux réalisés en très grand nombre par les Soviétiques⁴⁶ et qui relâchèrent dans l'atmosphère des radionucléides quelquefois dans des proportions substantielles , le dernier important étant le tir du 14 avril 1965 avec une puissance de 4,3 kt à moins 85 mètres qui relâcha dans l'atmosphère 910 kCi de ¹³¹I.

⁴⁵ ces chiffres de source américaine (Department of Energy) sont légèrement différents de ceux de l'UNSCEAR (86 au lieu de 100 en raison de classement différent de tirs de cratère à faible profondeur et vraisemblablement de tirs simultanés).

⁴⁶ Cf. infra

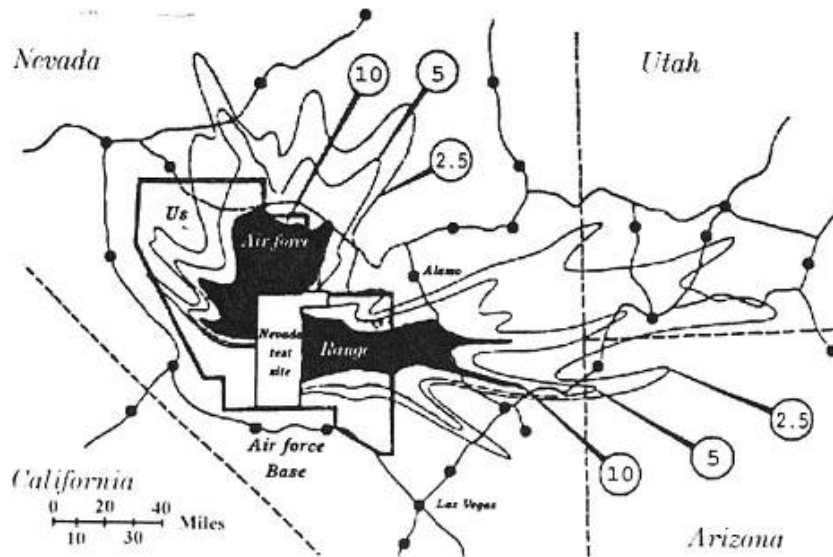
2. Les constats

2.1. Approche sommaire des schémas de retombées radioactives locales et régionales

On évoquera ici essentiellement les retombées locales et troposphériques, le problème spécifique de l'iode 131 étant abordé ensuite isolément.

La carte ci-après indique les estimations des schémas de contamination («contamination pattern») des essais nucléaires faits sur le site du Nevada jusqu'en 1958 (document « Dunning 1959 » cité par Scope/59).

Estimation des doses de radiations (en Roentgens)



Des études de reconstitution de doses ont été entreprises au fur et à mesure que des interrogations se faisaient jour, et notamment à partir du début des années 80. Dans la mesure où les inquiétudes ont d'abord porté sur les zones et régions contiguës au site d'essais, les recherches ont tout d'abord été limitées à ces cadres géographiques qui se caractérisent par un territoire où environ 180 000 personnes ont été exposées par irradiation externe. La dose collective est estimée à environ 500 homme.Sv ; les doses à la thyroïde pour les enfants peuvent avoir atteint 1 Gy.

Les premiers travaux d'estimation des doses par inhalation externe ont été menés par R. Anspaugh et B.W. Church⁴⁷.

La répartition des doses individuelles cumulées (externes) pour les zones géographiques se trouvant sous le vent du site d'essais est donnée par le tableau ci-dessous (cité par l'UNSCEAR) :

Dose efficace (mSv)		Nombre de personnes		Dose collective efficace (homme.Sv)	
Amplitude	Moyenne	1951-1958	1961-1963	1951-1958	1961-1963
< 0,06-0,6	0,2	61 000	180 000	12	36
0,6-3	1,3	80 000	480	104	0,6
3-6	4,2	19 000	0	80	
6-30	13	20 000	0	260	
30-60	42	520	0	22	
60-90	73	45	0	3,2	
Total arrondi		180 000	180 000	460	

L'estimation de la dose (externe) collective cumulée est donnée par le tableau suivant (ibidem 1990) qui montre clairement la concentration sur les séries d'essais de 1953 et 1955 (nombre élevé de tirs), juste avant que l'on ait recours aux tirs sous ballon.

Dose collective d'irradiation externe (estimation)

Nom des séries d'essais	Année	Dose collective (homme.Roentgen)
Ranger	1951	Réduite
Buster-Jangle	1951	610
Tumbler-Snapper	1952	4 700
Upshot-Knothole	1953	40 000
Teapot	1955	19 000
Plumbbob	1957	11 000
Hardtack II	1958	1 500
Several	1961-1963	610
Many	1963-1975	320
Total		78 000

⁴⁷ Anspaugh, L.R. and Church, B.W. (1986) Historical estimates of external gamma exposure and collective gamma exposure from testing at the Nevada Test Site. I. Test series through Hardtack II, 1958. Health Physics.

Anspaugh, L.R., Ricker, Y.E., Black, S.C., Grossman, R.F., Wheeler, D.L., Church, B.W. and Quinn, V.E. (1990) Historical estimates of external exposure and collective external exposure from testing at the Nevada Test Site. II. Test series after Hardtack II, 1958, and summary. Health Physics.

Ces estimations ont été réalisées sur 300 points dans un rayon de 300 km autour du site, dans l'état du Nevada et dans celui de l'Utah.

La dose efficace dépasse 3 mSv pour 20 % des 180 000 personnes concernées. Pour l'ensemble de cette population, la dose moyenne est de 2,8 mSv. Ces doses d'irradiation proviennent prioritairement de radionucléides à vie courte (demi-vie inférieure à 100 jours). L'activité à l'extérieur moyenne par individu est estimée à 50 % (c'est 20 % pour le taux habituel des calculs de l'UNSCEAR).

La plupart des irradiations proviennent d'un nombre réduit d'événements : 90 % de la dose collective cumulée de 470 personnes Sv provient de 17 tirs, les plus significatifs étant ceux du 19 mai 1953 (180 homme.Sv) et du 22 mars 1955 (70 homme.Sv). Les doses collectives qui touchèrent des zones plus lointaines sous le vent ont été évaluées à un niveau plus élevé que pour des zones proches, autour de 10 000 homme.Sv, notamment dans la région plus densément peuplée de Salt Lake City.

Des travaux de reconstitution des doses reçues ont été menés, pour ce qui concerne les retombées locales et régionales (à moins de 800 km du site d'essais), à partir de la fin des années soixante dix.

Si elles permettent de confirmer des analyses déjà envisagées, elles montrent aussi les difficultés d'interprétations précises et définitives. Elles se fondent en partie, pour certaines d'entre elles, sur des relevés et mesures réalisés précédemment.

Le programme d'examen des expositions à l'extérieur du site (ORERP) du Department of Energy a été engagé en 1979 ; les données dosimétriques ont servi de base à d'autres études dont celles citées ci-après ; ce sont des études épidémiologiques recherchant une relation entre niveaux d'exposition et fréquence des cancers. Elles ont donné lieu à des estimations dosimétriques a posteriori.

➤ L'étude cas-témoins de la leucémie dans l'Utah a été menée en vue de la recherche de l'explication du nombre apparemment anormalement élevé de leucémies chez les enfants dans le Sud de cet Etat, proche et sous les vents dominants du site d'essais (1177 cas et 5330 sujets contrôle). Le tableau ci-dessous confirme cette réalité, mais le commentaire qu'en font par exemple les auteurs de l'ouvrage «Nuclear Test Explosions - Scope/59 » limite quelque peu la portée de cette appréciation.

*Risques de mortalité par leucémie dans le Sud-ouest de l'Utah par comparaison
avec le reste de cet Etat, période 1955-80, par âge de décès
(Machado, Land et McKay, American Journal of Epidemiology, 1987)*

Taux normalisé pour 10 ⁵ par an (nombre de cas)				
Age de décès	Sud-ouest de l'Utah	Reste de l'Etat	Risque relatif	Intervalle de confiance à 90 %
All ages	10,30 (62)	6,68 (1219)	1,45	1,18-1,79
0-14	8,20 (9)	3,69 (110)	2,84	1,65-4,90
15-29	2,87 (4)	2,21 (122)	1,12	0,48-2,58
30-49	3,45 (5)	2,58 (135)	1,39	0,66-2,94
50 +	25,80 (44)	17,87 (852)	1,36	1,06-1,75

« Cela représente le premier indice d'un excédent de leucémies pouvant éventuellement être lié aux retombées, et pour lequel on n'a jusqu'à présent fourni aucune explication évidente sans rapport avec le rayonnement. Il faut cependant remarquer qu'il n'est pas forcément surprenant de découvrir un excédent de leucémies parmi les habitants d'une zone dans laquelle des groupes de leucémies ont été précédemment signalés. Le fait que le comté de Washington ait présenté les niveaux de retombées les plus élevés de l'Etat ne constitue pas la preuve d'un rapport de causalité avec le rayonnement. L'étude de Machado et al. et les deux études de mortalité antérieures, basées sur des contrastes géographiques, diffèrent par un aspect essentiel, c'est-à-dire par les comparaisons géographiques effectuées. Il est probable que les excédents de leucémies auraient été découverts plus tôt si la zone des retombées élevées avait été limitée à l'angle S.O. de l'Etat ».

La comparaison des doses à la moelle osseuse parmi les cas et les témoins montre d'ailleurs une exposition similaire avec une moyenne de 2,9 mGy chez les cas et 2,7 mGy chez les témoins (sujets-contrôle).

➤ L'étude de la cohorte de la thyroïde de l'Utah qui a porté sur 3545 personnes vise quant à elle les effets des irradiations internes du niveau de cet organe. Le tableau ci-dessous indique la répartition géographique des doses :

Doses de la thyroïde en mGy pour la cohorte de l'Utah (Till et al., 1995)

Comtés	Washington (Utah)	Graham (Arizona)	Lincoln (Nevada)	Total
Nombre de sujets	1896	1369	280	3545
Dose moyenne	170	13	50	98
Dose médecine	72	3,6	28	25
Minimum	0	0	0	0
Maximum	4600	450	840	4600
	2,7	3,0	2,7	2,8

La comparaison faite également dans l'article de Till (1995) entre la différence considérable induite par la consommation de lait illustre au niveau local ce qui sera confirmé par l'étude spécifique du NCI (Institut National du Cancer) en 1997 à l'échelle de la totalité du territoire américain continental :

Comparaison de la dose à la thyroïde (en mGy) entre les consommateurs et les non-consommateurs de lait

	Non consommateurs de lait	Consommateurs de lait	Consommateurs de lait de chèvre
Nombre de sujets	120	3337	155
Dose moyenne	12	100	300
Dose médiane	0,5	30	39
Dose maximale	25	4600	4600

D'une manière générale et à titre de conclusion partielle, les doses absorbées par les organes et les tissus par voie interne ont été, ainsi que l'indique le rapport UNSCEAR 2000, « substantiellement plus faibles que celles reçues par voie externe avec toutefois l'exception notable de dose à la thyroïde » qui dépasse très largement à la fois l'ensemble de l'irradiation externe et de l'irradiation interne à d'autres organes, laquelle s'est faite par ailleurs à travers l'inhalation d'air et l'ingestion d'aliments contaminés.

2.2. L'étude du NCI (Institut National du Cancer) et ses suites

Les études qui viennent d'être présentées étaient destinées à répondre aux interrogations et aux inquiétudes qui s'étaient fait jour depuis le début des années 70, plus particulièrement parmi les populations proches du site d'essais du Nevada, et notamment dans l'Utah. Cette inquiétude s'est aussi manifestée, certes dans de moindres proportions, au-delà de ces limites régionales.

C'est dans cette perspective qu'a été adopté en 1983 un texte législatif (Public law 97-414, section 7a) qui a chargé au niveau fédéral le Secrétaire à la santé et aux services sociaux de :

« ❶ *conduire la recherche scientifique et de préparer les analyses nécessaires à l'élaboration d'évaluations validées et crédibles sur les risques de cancers de la thyroïde qui sont associés aux doses d'iode 131 ;*

❷ *conduire la recherche scientifique et de préparer les analyses nécessaires à l'élaboration de méthodes validées et crédibles pour évaluer les doses à la thyroïde d'iode 131 qui ont été reçues individuellement à partir des retombées de bombes nucléaires,*

❸ *et de conduire la recherche scientifique et de préparer les analyses nécessaires pour établir des évaluations validées et crédibles de l'exposition à l'iode 131 que le peuple américain a subi à partir des essais atmosphériques de bombes nucléaires du Nevada ».*

Le NCI précise lui-même dans l'introduction de son rapport rendu public en août 1997 (et publié en octobre de la même année) qu'« *il a été demandé au NCI de répondre à cette requête. Ce rapport décrit les données, les méthodologies et les analyses qui ont été mises en œuvre pour répondre au deuxième et troisième parties de la requête. Le rapport ne répond pas à la question du risque de cancer à la thyroïde associé aux doses à la thyroïde d'iode 131. Les efforts pour estimer ce risque ont été et continuent d'être l'objectif de nombre d'études passées ou en cours sur les personnes exposées à l'iode 131 à partir de procédés de diagnostic et à partir d'une contamination de l'environnement dans l'Utah, dans le voisinage de Hanford, la région de Washington, en Suède, en Slovaquie, en Israël, en Biélorussie, dans la Fédération de Russie et en Ukraine* ».

Cette limitation du champ du rapport du NCI rendu après quatorze ans de travaux et de recherches a été en partie compensée par l'analyse de ce rapport qui a été demandée en août 1997 conjointement à l'Institut de Médecine (de l'Académie nationale des Sciences) et au Conseil National de la Recherche ainsi que par leurs propres travaux qui complètent et illustrent cette analyse (rapport remis au début 1999).

➤ Concernant le rapport du NCI lui-même, son intérêt spécifique réside essentiellement dans la mesure, l'estimation et la modélisation des retombées d'iode 131 de chaque tir, pour l'ensemble des 3050 comtés des 48 états continentaux (y compris les tirs cratère et les tirs souterrains mal confinés) des Etats-Unis depuis 1951. Au sein de chaque comté, la population a été structurée en treize groupes d'âge (outre bien sûr la division par sexe) ainsi constitués : quatre groupes pendant la vie fœtale, quatre pour la première année, quatre également de 1 à 20 ans et un groupe pour les adultes.

A l'exception des adultes, cette stratification a permis la prise en compte de régimes alimentaires spécifiques, notamment en ce qui concerne la consommation de produits lactés.

La reconstitution des doses dues à l'iode 131 est donc délicate et repose sur l'estimation rétrospective de la quantité rejetée et des modèles de dispersion atmosphérique confrontée aux mesures directes d'iode 131 effectuées immédiatement après les tirs.

Ces informations détaillées sont essentiellement rendues par des cartes géographiques illustratives dont seules quelques unes sont reproduites en annexes (cartes pour les générations nées en 1945 et 1952 des reconstitutions de doses à la thyroïde). L'un des scientifiques, dont on indiquera les critiques du rapport au NCI qu'il a faites devant une sous-commission du Sénat américain, M. F. Owen Hoffman, soulignait précisément dans ce cadre en septembre 1998, que la reconstitution des doses était, de loin, la plus importante et la plus exhaustive jamais réalisée aux Etats-Unis, qu'elle recelait de très nombreuses informations.

La dose collective totale d'iode 131 pour l'ensemble de la population des Etats-Unis pour la totalité des essais atmosphériques du Nevada est estimée par le NCI à 4×10^8 homme.rad, la dose par personne à la thyroïde à 2 rad (environ 20 mGy).

D'autres radionucléides que l'iode 131 ont contribué à la dose interne par personne dans une proportion de 10 % environ. Les doses les plus significatives ont été concentrées sur les séries d'essais de 1957 (32 %), 1952 (29 %) et 1953 (23 %). Ces essais, pour la plupart de faible puissance, ont engagé des produits radioactifs qui sont restés pour l'essentiel dans la troposphère et ont dégagé la majeure partie de leur radioactivité pendant le premier passage du nuage.

Les doses moyennes à la thyroïde sont évaluées (pour la totalité de la période) à 5 mGy pour les personnes adultes au début de la période des essais, en 1951 et à 30 mGy pour celles nées en 1951.

Les comtés pour lesquels les retombées d'iode 131 ont été les plus fortes sont logiquement ceux du Nevada et de l'Utah (proximité et situation sous les vents dominants) ; ceux pour lesquels elles ont été les plus faibles sont ceux de la côté Pacifique Nord-Ouest c'est-à-dire dans les états de Washington et de l'Oregon. Les estimations de doses par comté pour les enfants nés en 1951 vont de moins de 0,1 mGy dans moins d'une dizaine de comtés jusqu'à 300 mGy dans 550 comtés. Les doses reçues par les adultes sont à peu près dix fois inférieures.

La série de cartes de reconstitution des doses d'irradiation interne d'iode 131 illustre le rôle essentiel de la consommation de lait qui a amené le NCI à présenter pour chaque année les doses en quatre catégories par degré d'irradiation croissant : non consommateurs de lait, consommateurs moyens,

consommateurs importants et consommateurs de lait de « vache élevée en plein air ». Enfin, le lait de chèvre s'est révélé être un vecteur encore plus contaminant.

Appelé à apprécier la validité de ces estimations d'irradiation à l'iode 131 au niveau national, à celui des comtés et au niveau individuel, le rapport IOM/NRC indique dans sa synthèse :

- « 1. *Le NCI a entrepris une tâche très délicate, qui reposait sur des données peu nombreuses, à la fiabilité et à la validité incertaines, pour tenter de s'acquitter de la mission que lui avait conférée le Congrès. Le rapport du NCI constitue une tentative minutieuse, précise et responsable, d'estimer l'irradiation à l'iode 131 libéré lors des essais d'armements nucléaires dans le Nevada. Les méthodes appliquées par le NCI sont jugées généralement raisonnables, même si certains aspects particuliers sont contestables.*
2. *L'estimation des doses collectives d'iode 131, reçues par la population américaine, est cohérente avec l'analyse faite par le comité, et il est peu probable que ces chiffres surestiment ou sous-estiment grandement les niveaux effectifs.*
3. *Les niveaux de précision présentés dans le rapport, et singulièrement dans les estimations par comté de la dose d'iode 131 fixée dans la thyroïde, sont probablement trop incertains pour être repris dans une estimation de la contamination individuelle. Pour l'essentiel, les mesures directes des retombées de chaque essai particulier n'ont été effectuées qu'en une centaine de lieux dans tout le pays (hormis au voisinage du site des essais lui-même). Les estimations des risques d'irradiation par comté peuvent aussi être de peu d'intérêt pour certains individus pour lesquels l'irradiation est fonction de facteurs critiques, tels que la variation de la consommation individuelle de lait et d'autres denrées alimentaires, ou encore des changements dans la provenance de ces denrées.*
4. *Les estimations par individu de l'irradiation passée à l'iode 131 libéré lors des essais nucléaires dans le Nevada sont possibles, mais incertaines, voire hautement incertaines, parce que l'on manque très souvent de données critiques, ou que la fiabilité des données disponibles est douteuse. Les individus qui étaient encore enfants à l'époque des essais et qui buvaient régulièrement du lait de vache élevée en plein air, et surtout du lait de chèvre, constituent une petite minorité de la population exposée de façon significative à l'iode 131.*

➤ La déclaration de M. F. Owen Hoffman devant la sous-commission des enquêtes permanentes du Sénat⁴⁸ comporte un passage mettant en lumière les **résultats spécifiques** de l'étude du NCI :

Doses significatives reçues dans les régions du Centre-Ouest et de l'Est des Etats-Unis.

L'une des conclusions les plus importantes du rapport NCI est l'abondance des retombées qui se sont produites dans les régions du Centre-Ouest et de l'Est des Etats-Unis. Dans de nombreux cas, les doses à la thyroïde reçues par des enfants résidant dans l'Est des Etats-Unis étaient équivalentes ou supérieures à celles reçues par des enfants vivant dans les comtés voisins du polygone du Nevada, dans lesquels les résidents peuvent prétendre à des indemnités en compensation de cancers radiogéniques spécifiques en vertu de la loi de 1990 sur l'indemnisation de l'exposition au rayonnement.

Ainsi, d'après les informations disponibles sur le site Internet du NCI, un enfant né en janvier 1952 dans le comté de Clark, Etat du Nevada, aurait pu recevoir une dose à la thyroïde allant de 0,4 à 68 rads, avec une valeur centrale estimée de 5,5 rads, si le régime alimentaire de cet enfant comprenait une quantité moyenne de lait acheté dans un magasin. Un enfant ayant une date de naissance et un régime alimentaire similaires, né à Washington, D.C. aurait pu recevoir une dose allant de 1,2 à 21 rads, avec une valeur centrale estimée de 5 rads.

Les doses moyennes les plus élevées ont été reçues par les personnes qui étaient dans l'enfance au moment des tirs.

On estime que la dose moyenne à la thyroïde pour 3,5 millions d'enfants de moins de un an pendant l'année 1952 allait de 5 à 20 rads, avec une valeur centrale estimée de 10,3 rads (environ 100 mGy). La dose moyenne pour environ 14 millions d'enfants ayant un âge compris entre 1 et 4 ans en 1952 allait de 3,4 à 13 rads avec une valeur centrale estimée de 6,7 rads. La dose moyenne pour un autre groupe de 14 millions d'enfants d'âge compris entre 5 et 9 ans en 1952 allait de 2,3 à 9 rads, tandis que, pour 23,9 millions d'enfants d'âge compris entre 10 et 19 ans en 1952 la moyenne allait de 1,2 à 4,6 rads. La majorité de ces enfants résidait dans les régions plus peuplées de l'Est des Etats-Unis

On a relevé des doses individuelles élevées chez les enfants ayant consommé du lait provenant de sources non-commerciales, ou des quantités de lait du commerce supérieures à la moyenne.

⁴⁸ F. Owen Hoffman a fait cette déclaration étant auditionné le 16 septembre 1998 soit un an après la publication du rapport du NCI et au moment où la teneur du rapport de l'IOM/NRC était déjà connue ; il a été l'un des quatre consultants du comité IOM/NRC auteur de ce dernier rapport.

L'âge au moment de l'exposition ainsi que la quantité et le type de lait consommé constituaient d'important facteurs déterminants de la dose. Par exemple, dans le cas des enfants nés en 1952 qui ont consommé soit des quantités supérieures à la moyenne de lait acheté au détail, ou du lait provenant de sources locales telles qu'une vache familiale ou une ferme voisine, on trouvait aux U.S.A. environ 270 comtés où les valeurs centrales estimées des doses totales à la thyroïde auraient pu dépasser 30 rads, et près de 2500 comtés où les doses centrales estimées atteignaient 10 à 30 rads. Par contre, pour les individus ayant un régime alimentaire similaire nés au début de 1945, il n'y avait que 600 à 700 comtés où les doses totales dépassaient 10 rads. Pour les individus ayant un régime alimentaire similaire nés au début de 1957, les doses à la thyroïde dépassaient 30 rads dans un nombre de comtés allant de 13 à 30, et 10 rads dans un nombre de comtés allant de 700 à plus de 1000.

On a relevé les doses les plus élevées parmi les enfants ayant consommé du lait de chèvre.

Les doses à la thyroïde maximales auraient été reçues par des enfants qui, pour une raison quelconque, auraient consommé du lait provenant de chèvres familiales ou d'un élevage local. Chez ces individus, les doses à la thyroïde pourraient avoir atteint ou dépassé les 100 rads. La consommation de lait de chèvre provoque des doses plus élevées parce que les chèvres transfèrent l'iode à leur lait beaucoup plus efficacement que les vaches. Dans le comté Meagher (Montana), où les doses estimées sont les plus élevées, un enfant né en 1952 qui aurait consommé du lait de chèvre est estimé avoir potentiellement reçu une dose à la thyroïde allant de 20 à plus de 5000 rads, avec une valeur centrale estimée de 330 rads. Le NCI estime qu'il aurait pu y avoir aux U.S.A. jusqu'à 40 000 personnes ayant consommé du lait de chèvre à l'époque des essais atmosphériques sur le NTS, dont peut-être jusqu'à 14 000 de ces consommateurs de lait de chèvre étaient âgés de moins de 15 ans.

➤ Pour apprécier ces résultats spécifiques, M. F. Owen HOFFMAN les remet en perspective avec les normes et prescription de protection de l'époque et d'aujourd'hui :

Comparaison avec les valeurs-guides de radioprotection

A l'époque des essais, le Commissariat à l'Energie Atomique des Etats-Unis (U.S. Atomic Energy Commission) était auto-réglementé. Il n'existait pas de guides applicables à l'exposition de la thyroïde. En 1957, la limite opérationnelle d'irradiation gamma externe "corps entier" était fixée à 3,9 Røentgens par an ou par série d'essais pour les expositions hors site. La déposition faite en 1957 par Gordon Dunning prouve que l'AEC avait conscience du fait que les doses à la thyroïde chez les enfants auraient pu être importantes, mais aucune limite particulière ne fut établie.

En 1964, le Federal Radiation Council (FRC) (Conseil Fédéral de Radioprotection) recommandait comme mesure de radioprotection une limite de dose cumulée de 10 rads pour un échantillon d'homogénéité adéquate d'enfants ayant moins de 1 an à l'époque des essais. La dose moyenne pour 3,5 millions d'enfants ayant moins de 1 an à l'époque des essais était 10,3 rads, ce qui indique que, pour un nombre important d'enfants, les doses auraient pu dépasser la valeur-guide du FRC. Pour les enfants de moins de 1 an ayant consommé une quantité de lait supérieure à la moyenne, et pour ceux ayant consommé du lait provenant de fermes locales, de vaches familiales ou de chèvres, les doses auraient été très supérieures à la valeur-guide du FRC.

Actuellement, les valeurs-guides de la Food and Drug Administration (FDA) (Agence de l'Alimentation et des Médicaments) sont fixées à 1,5 rad et 15 rads, la première étant la valeur-guide de prévention (alimentation des vaches à partir de stocks d'aliments non-contaminés), et la deuxième la valeur d'intervention urgente (confiscation du lait dans les magasins pour en éviter la distribution). Pour des doses à la thyroïde de 25 rads ou plus, l'EPA (Environmental Protection Agency = Agence pour la Protection de l'Environnement) recommande d'administrer de l'iode stable afin de bloquer l'absorption d'I-131 par la thyroïde. L'étude NCI indique nettement que ces niveaux de dose auraient pu être dépassés en de nombreux points des U.S.A. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a entrepris de recommander l'administration d'iode stable aux populations potentiellement exposées lorsqu'il s'agira d'éviter des doses éventuelles supérieures à 1 rad chez les enfants de moins de 18 ans. Chez les enfants nés au début de 1952 qui ont consommé du lait provenant de sources non-commerciales, ou des quantités de lait commercial supérieures à la moyenne, la dose à la thyroïde de 1 rad résultant de l'exposition à l'I-131 du NTS a été dépassée pratiquement partout aux U.S.A.

Comparaison avec les normes de radioprotection

Les doses à la thyroïde résultant de l'exposition aux retombées dépassaient également les normes fixées par les directives passées et présentes. En 1954, le NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements = Conseil national de radioprotection et de mesure des rayonnements) recommandait pour les enfants une dose limite de 1,5 rem par an au niveau des organes critiques du corps humain. Pour l'I-131, un rem est équivalent à un rad. Bien que cette limite ait été fixée pour une période d'un an les expositions individuelles aux retombées d'I-131 du NTS ont fréquemment dépassé cette limite sur la durée d'une seule série d'essais, ladite durée étant inférieure à quelques mois. »

2.3. Les estimations des risques de cancer.

Le rapport IOM/NRC résume son appréciation de cet aspect, indiscutablement le plus difficile à traiter, dans les termes suivants :

« Le rapport en deux volumes du NCI sur la reconstitution des doses reçues ne comportait pas d'estimations du risque de cancer de la thyroïde en relation avec ses estimations de la contamination à l'iode 131, libéré lors des essais nucléaires dans le Nevada. Une note séparée, diffusée ultérieurement, fournissait des estimations sur le risque de cancer de la thyroïde du vivant des personnes ainsi que le nombre de cas de cancer en excès liés à cette contamination. Outre l'examen des estimations, des hypothèses et des méthodes du NCI, le comité a également passé en revue les publications sur le cancer associé à l'irradiation à l'iode 131, ainsi que les statistiques épidémiologiques sur la prévalence du cancer de la thyroïde aux États-Unis. La principale conclusion de cette analyse des publications est que le lien entre le cancer de la thyroïde et l'exposition à l'iode 131 des retombées, longtemps considéré comme incertain, est désormais fondé sur la base des études réalisées à la suite de l'accident du réacteur nucléaire de Tchernobyl, en 1986. Ces études ayant porté principalement sur des enfants et ne permettant qu'un recul nécessairement limité, les implications pour les adultes actuellement d'âge moyen restent à clarifier.

Selon les estimations révisées du NCI, qui ne sont ventilées ni par comté ni par État, la contamination à l'iode 131 libéré lors des essais atmosphériques dans le Nevada produira entre 11 300 et 212 000 cas supplémentaires de cancer de la thyroïde du vivant des personnes, avec une estimation moyenne ou centrale de 49 000 cas. Le comité estime que la démarche suivie par le NCI pour élaborer ses estimations des cas de cancer en excès liés à l'iode 131 est généralement raisonnable, mais il met tout de même en doute certaines hypothèses. Il a observé en particulier qu'il y a désaccord au sein de la communauté scientifique sur l'hypothèse de la linéarité dose-réaction, en vertu de laquelle même une infime dose d'iode 131 fixée dans la thyroïde se traduit par un risque carcinogène supplémentaire. La plupart des doses d'irradiation à l'iode 131 résultant des essais dans le Nevada étaient des doses faibles, pour lesquelles l'hypothèse d'un risque de cancer n'est guère vérifiée.

Plusieurs études épidémiologiques ne corroborent guère les estimations les plus élevées sur les cas de cancer en excès en relation avec l'iode 131, même si ces études présentent aussi certaines limites, qui restreignent leur aptitude à détecter les effets des retombées d'iode 131 sur la population. Compte tenu de ces limites, les analyses suggèrent que les cas de cancer en excès sont nettement en deçà de la fourchette supérieure donnée par le NCI et se situent probablement dans le bas de cette fourchette. Une autre analyse (fondée sur l'hypothèse selon laquelle le risque de développer un cancer est constant pour une personne durant son vivant) suggère qu'environ 45 pour cent des cancers de la thyroïde liés à l'iode 131 sont d'ores et déjà apparus. Bien que le comité mette en garde contre le fait d'utiliser

les doses estimées par le NCI au niveau des comtés pour apprécier le risque individuel de cancer de la thyroïde, il suggère que la probabilité d'une contamination significative est plus grande pour ceux qui étaient de jeunes enfants à l'époque et qui avaient l'habitude de boire du lait de vache élevée en plein air, et surtout du lait de chèvre. »

Les estimations faites par ailleurs restent très voisines. Ainsi, M. F. Owen Hoffman (cf. supra) donne une amplitude de 8000 à 203 000 cas supplémentaires. Dans cette même déclaration, et dans la même tonalité que le rapport IOM/NRC, il insiste sur le caractère relatif de la dose comme indicateur de risque :

« Le traitement du risque pour la santé dans le cadre du rapport NCI est essentiel, car sans lui il n'est pas facile de déterminer l'impact total des essais d'armes sur la population des U.S.A. En l'absence de ce traitement, le lecteur ne peut pas savoir qu'un adulte du sexe masculin, habitant près du polygone d'essai du Nevada à l'époque des essais, et ayant reçu une dose à la thyroïde pouvant atteindre 20 rads, court un risque dix fois moindre qu'une petite fille habitant dans l'Est des U.S.A. et ayant reçu une dose limitée à 0,5 rad. Le sexe et l'âge au moment de l'exposition sont plus importants dans la détermination du risque que la dose, le régime alimentaire et la situation géographique. »

Dans toutes les hypothèses, il apparaît que la majorité des cas se trouveront parmi les femmes ayant résidé dans le Middle-West ou dans l'Est des Etats-Unis et qui avaient huit ans au plus à l'époque de la fin des essais.

➤ Les estimations de mortalité

Le même auteur (F. Owen Hoffman) fournit une indication quant à la mortalité induite au vu de ces estimations de cancers radio-induits de la thyroïde : *« Bien que les traitements du cancer de la thyroïde soient extrêmement efficaces, le traitement clinique nécessite en général l'ablation de la glande thyroïde et le placement à vie du patient sous hormone thyroïdienne de synthèse. Moins de 10 % des cas diagnostiqués de cancer de la thyroïde se traduisent par un décès prématuré dans les 20 ou 30 ans suivant le traitement. Cela veut dire que la mortalité radiogénique induite par une exposition à l'iode 131 des retombées des essais d'armes sur le NTS pourrait être supérieure à 1000 décès mais probablement inférieure à 20 000 décès, la valeur centrale estimée étant de plus de 4000 décès. »*

2.4. « Les informations pour la pratique clinique et la santé publique »

C'est en ces termes que les conclusions essentielles du rapport de l'IOM/NRC sont regroupées face à un problème d'autant plus délicat que les bases scientifiques des constatations n'ont pas la rigueur qu'on attend naturellement, surtout après des travaux de reconstitution et d'analyses aussi

considérables. Ces conclusions formulent ainsi le dilemme et fournissent quelques préconisations :

« Du point de vue de la pratique clinique et de la politique de santé publique, les estimations du NCI sur l'irradiation à l'iode 131 et sur le risque carcinogène posent un problème critique, en ce sens qu'elles ne sont pas d'une grande aide pour identifier les individus présentant un risque significativement élevé de développer un cancer de la thyroïde. En outre, le cancer de la thyroïde induit par des radiations ne peut pas être distingué d'un cancer de la thyroïde induit naturellement.

En tout état de cause, le fait de disposer d'estimations plus précises ne modifierait pas de façon majeure les conclusions (du comité IOM/RNRC) allant à l'encontre d'un dépistage de routine de la population en général, ou de sous-groupes de population potentiellement exposés à l'iode 131. Cette recommandation du comité se fonde sur l'absence de faits attestant qu'une détection précoce du cancer de la thyroïde par un dépistage (plutôt que par une thérapie clinique de routine) améliorerait l'état de santé des patients. Le comité observe que le cancer papillaire de la thyroïde, qui est la forme la plus courante du cancer de la thyroïde induit naturellement et la forme associée à l'irradiation, présente un taux de survie élevé, quelle qu'en soit la cause, lorsque celui-ci est diagnostiqué dans le cadre d'une pratique clinique de routine sans dépistage. Les personnes diagnostiquées avec un cancer papillaire sont encore 90 pour cent à être en vie, 30 ans après.

Le dépistage présente potentiellement des avantages et des inconvénients. Le dépistage de routine d'un cancer thyroïdien par palpation et, plus particulièrement, par ultrasons, identifiera de nombreux nodules dont la plupart ne présenteront pas de caractère malin. Cette identification donnera lieu à d'autres examens par biopsie (FNA). Les biopsies permettront de découvrir quelques nodules cancéreux, ne détecteront pas de cancer dans la grande majorité des nodules et donneront une proportion significative d'échantillons indéterminés ou insatisfaisants (de 20 à 30 pour cent, voire plus), qui peuvent déboucher sur une chirurgie de la thyroïde inutile pour de nombreuses personnes ne souffrant pas d'un cancer de la thyroïde, ou qui souffrent d'un cancer peu évolué, qui n'évoluera jamais au point d'occasionner des problèmes de santé.

Etant donné les craintes populaires à l'égard du cancer et l'inquiétude suscitée par les radiations, la portée souvent modeste des campagnes d'information du public et les recommandations contraires émises par d'autres groupes, il est probable que les cliniciens verront certains de leurs patients exprimer des craintes vis-à-vis d'une possible exposition à des (...) retombées radioactives et demander un dépistage du cancer de la thyroïde. Même si le comité estime que la décision d'un examen physique, incluant la palpation de la thyroïde, doit être une décision conjointe, il se prononce contre un dépistage par ultrasons pour les patients ne présentant pas de symptômes ».

2.5. La situation des participants aux essais

Les effets des radiations qui ont pu être reçues par les personnels participant aux essais nucléaires ont déjà été abordés, en ce qui concerne les Etats-Unis, à propos du site de Bikini (opération «Crossroads » en 1946). La présence des personnels militaires aux nombreuses séries d'essais ayant eu lieu au Nevada de 1951 à 1958 a concerné approximativement près de 220 000 soldats. Le nombre de ceux, beaucoup plus restreint, qui ont été en position de recevoir des doses significatives de radioactivité n'est pas facile à préciser davantage d'autant que le suivi dosimétrique individuel n'a pas été assuré d'une manière très large ni systématique (cf. infra).

Dans le cadre d'une ouverture de l'information sur l'ensemble des thèmes relatifs à l'exposition à la radioactivité, un rapport (rendu en 1995) que l'on peut qualifier d'exhaustif du comité consultatif sur l'expérience des radiations sur l'homme (ACHRE selon le sigle américain) créé en janvier 1994 par le Président Clinton, a largement traité, entre autres, celui des effets éventuels des essais nucléaires, notamment pour les personnels participants.

Quelques extraits du chapitre 10 relatif aux essais permettent de situer les données du problème et d'indiquer quels enseignements on peut en tirer sur le plan de l'épidémiologie.

➤ Pratique du suivi dosimétrique ne répondait pas à une conception générale et systématique « couvrante », ainsi que le montrent les documents disponibles depuis longtemps mais aussi ceux obtenus par le Comité :

« Pour la série "Upshot Knothole" de 1953, qui comprenait l'étude "DesertRock V HumRRO", les données du DOD (Department of Defense) de 1994 montrent que seulement 2282 des 17 062 participants ont été reconnus comme ayant reçu des dosimètres photographiques individuels. Pour Désert Rock V, la politique du Service de Santé des Armées, qui était que les expositions ponctuelles n'avaient pas à être enregistrées, conduisit à décider que les troupes en manœuvre recevraient un dosimètre photographique par section, et que les observateurs en recevraient un par autocar. Une circulaire de l'AFSWP (Armed Forces Special Weapons Project) signalait que le Service de Sécurité Radiologique ne disposait pas de dosimètres de poche en quantité suffisante pour effectuer sa tâche correctement. Une circulaire du DOD, récemment déclassifiée, signale que (bien que les dosimètres photographiques portés par les officiers volontaires pour Désert Rock V) aient indiqué une dose gamma moyenne de 14 Roentgens, les meilleurs renseignements dont on dispose suggèrent que la dose véritable était probablement une dose initiale gamma plus neutrons de 24 rem ».

➤ La recherche sur des cohortes par série d'essais a donné quelques indications mais dont la confirmation est toujours difficile à établir surtout si l'on prend en compte les incertitudes quant aux données de base (dosimétrie,

inclusions ou exclusions à tort de certaines parties des effectifs dans les groupes suivis, etc...) :

« En 1980, les Centers for Disease Control (CDC) (Centres de Contrôle des Maladies) ont signalé un groupe de 9 leucémies parmi les 3224 participants (identifiés à l'époque) au tir «Smoky» sur le polygone d'essais du Nevada en 1957. Un rapport ultérieur porte à 10 le nombre de leucémies recensées, contre un nombre prévisible de 4 sur la base du taux d'atteinte U.S., sans toutefois signaler d'excès de cancers affectant les autres sites anatomiques (le total recensé étant de 112 contre 117,5 prévus). L'essai «Smoky» a été le tir sur tour le plus puissant jamais effectué sur le polygone d'essais du Nevada; toutefois, les doses mesurées pour les participants à cet essai, en tant que population, étaient trop faibles pour expliquer cet excès. On ne sait toujours pas si ce groupe représente un événement aléatoire, une sous-estimation des doses reçues par les quelques participants ayant contracté une leucémie, ou s'il y a une autre explication.

A la lumière des études CDC, l'Académie Nationale des Sciences (NAS), a alors entrepris une étude élargie à cinq séries d'essais, réunissant 46 186 participants (identifiés à l'époque). Le rapport NAS de 1985 confirmait les excédents de leucémies pour l'essai Smoky, sans toutefois trouver de tels excédents dans aucune des séries d'essais (à la différence des essais pris séparément), ni aucun schéma concordant d'excédents pour les autres sièges de cancer. Cependant, il se révéla ultérieurement que l'étude NAS avait été faussée par l'inclusion de 4 500 individus qui n'avaient jamais participé aux essais et l'exclusion de 15 000 individus qui avaient participé à une ou plusieurs des cinq séries, ainsi que par une dosimétrie incomplète.

La découverte tardive du fait que des milliers de participants aux essais avaient fait l'objet d'identifications erronées soulignait avec force les déficiences dans la saisie et l'archivage des données auxquelles étaient confrontés ceux qui cherchaient, après de nombreuses années, à reconstituer les degrés d'exposition des participants aux essais ».

Dans un rapport de 1995, l'Institut de Médecine a trouvé que les estimations de dose qui avait été proposées pour utilisation dans l'étude de suivi de la NAS était inutilisables à des fins épidémiologiques, tout en concluant qu'il serait possible de créer un système de reconstitution des doses pouvant être utilisé dans ce but. Il existe cependant d'autres études qui sont d'un intérêt direct.

Récemment, Watanake et al. ont étudié la mortalité parmi 8554 anciens combattants de la Marine ayant participé à l'opération "Hardtack" au Centre d'Essais du Pacifique en 1958. C'est actuellement la seule étude d'anciens combattants américains comprenant un groupe-témoin de militaires non exposés au rayonnement. Dans l'ensemble, le groupe de participants présentait un taux de mortalité plus élevé de 10%, mais l'excédent de cancers n'était significatif que pour l'ensemble de la catégorie des organes digestifs (66 décès, à

comparer avec 44,9 prévus, soit une augmentation de 47 pour cent). En moyenne, les doses de rayonnement étaient faibles (388 mrems en moyenne), mais parmi les 1094 hommes ayant reçu des doses supérieures à 1 rem, on constatait un excédent de 42 pour cent pour toutes les formes de cancer. Aucune catégorie de siège de cancer ne montrait d'excédent significatif ni de relation nette entre dose et effets, mais le nombre de décès dans chacune des catégories était faible.

Les effets ainsi observés doivent être placés dans le contexte de ce que l'on peut raisonnablement attendre sur la base de ce que l'on sait actuellement des risques liés au rayonnement à faible dose, et des doses que l'on pense avoir été reçues par les anciens combattants. Environ 220 000 militaires ont participé à au moins un essai nucléaire. Les dosimètres photographiques de ceux qui en étaient munis (considérés comme à peu près représentatifs de l'ensemble des participants) indiquent en moyenne 600 mrem. Comme l'indique en résumé la section "Eléments Fondamentaux de la Science des Rayonnements" de l'Introduction, l'opinion générale des experts est que le risque, sur une vie entière, de subir un cancer mortel du au rayonnement est d'environ 8 pour 10 000 hommes-Rem. Sur cette base, on peut prévoir un excédent d'environ 106 décès dus à des cancers pouvant être liés à une participation à des essais nucléaires. Ce chiffre est non seulement très incertain, mais faible par comparaison avec les 48 000 décès par cancer que l'on peut prévoir, à terme, pour cette population.

Il serait virtuellement impossible de déceler un excédent aussi faible par des méthodes épidémiologiques. Toutefois, dans certains sous-groupes, l'augmentation relative par rapport aux taux normaux pourrait être assez importante pour être décelable. La leucémie, par exemple, est proportionnellement beaucoup plus radio-sensible que les autres cancers et l'excédent le plus important se produit assez tôt après l'exposition, lorsque les taux naturels sont bas. Une concentration sur les sujets les plus exposés accentuerait aussi l'augmentation relative, avec toutefois un risque limité à un nombre de personnes très inférieur. La Defense Nuclear Agency estime qu'environ 1200 anciens combattants ont reçu plus de 5 Rems (8,1 rems en moyenne). Sur cette base, on pourrait prévoir environ huit décès supplémentaires par suite de cancer. Ces facteurs pourraient avoir contribué à l'excédent de leucémies observé, par exemple, parmi les participants au tir "Smoky".

➤ Les éléments d'information sur différentes séries d'essais pratiqués sur le site du Nevada (et accessoirement sur celui du Pacifique) montrent la difficulté d'obtenir des résultats conclusifs même sur des effectifs importants, pour de nombreux essais et pour des expositions qui, dans certains cas, n'ont pas été négligeables. Le comité consultatif (ACHRE) conclut sur ce point quant aux décisions à prendre en matière d'études épidémiologiques plus poussées :

« Comme le montrent clairement les données épidémiologiques dont on dispose actuellement, il n'existe pas de schéma cohérent pour les risques supplémentaires de cancer parmi les anciens participants aux essais atomiques, bien qu'il y ait un certain nombre d'indications, en particulier les excédents de

leucémie chez les participants au tir Smoky et aux essais britanniques, dont les causes sont toujours inexpliquées. En raison de la faiblesse des doses enregistrées, du petit nombre des excédents prévus et des problèmes de dosimétrie et d'archivage, il est très difficile de déterminer si les anciens des essais atomiques, en tant que groupe, présentent un risque de cancer notablement plus élevé, et si les excédents constatés peuvent être attribués à leur exposition au rayonnement. Ayant procédé à l'examen approfondi de l'intérêt que pourraient présenter des études épidémiologiques plus poussées, le Comité consultatif est parvenu à la conclusion que la décision d'entreprendre de telles études devrait être prise par d'autres groupes d'experts constitués à cet effet ».

Les rapporteurs de la présente étude qui ne sont pas des experts et notamment pas des épidémiologistes ne peuvent que souligner et reprendre une telle conclusion, sachant en outre que les questions posées n'ont que de lointains rapports avec celles qui ont pu se poser pour la France.

3. Les essais souterrains

Les essais nucléaires souterrains aux Etats-Unis ont commencé en 1951 et se sont poursuivis jusqu'en 1992, année où six tirs ont encore eu lieu.

Le nombre d'essais s'élève à 815 auxquels s'ajoutent 24 essais conjoints anglo-américains sur le site du Nevada ; il s'agit là des éléments chiffrés fournis en 2000 par le Département of Energy (cf. supra). L'UNSCEAR, de son côté, en a comptabilisé 908 pour les seuls essais américains dans son rapport 2000, mais en 1993, elle n'en comptait, pour le seul site du Nevada, que « *plus de 500* ». L'ouvrage de Sir Frederick Warner et René J.C. Kirchmann, Scope/59, (op. cit.) avance le chiffre de 910.

Ces écarts peuvent peut être s'expliquer par des essais comportant des tirs en salve (maximum huit charges).

Le tir le plus puissant (5 Mégatonnes) a été celui réalisé en Alaska, dans les îles Aléoutiennes à Amchitka le 6 novembre 1971 pour tester une ogive du missile *Spartan*. Auparavant, deux autres tirs souterrains avaient eu lieu sur cette île de 300 km², l'un de 1Mt à 1200 m en octobre 1969, l'autre de 80 kt à 700 m de profondeur en octobre 1965. Il s'agit là d'exceptions puisque la plupart des essais ont été considérablement plus faibles (de la kilotonne à la centaine de kilotonnes).

On ne dispose pas d'informations détaillées sur la vingtaine d'essais qui ont eu lieu en dehors de l'Alaska et du site du Nevada. S'agissant de ce dernier, ce sont les relâchements de radionucléides dans l'atmosphère qui retiennent particulièrement l'attention et ce, pour deux catégories de circonstances très différentes : les essais militaires qui n'ont pas été complètement confinés d'une part, les tirs d'excavation (ou « cratering ») qui par définition, avec les

déchets qu'ils soulèvent et mettent en circulation dans l'atmosphère, sont à l'origine d'importantes émissions radioactives.

➤ Les essais souterrains militaires

Trente deux tirs au Nevada ont entraîné le relâchement de 5 000 TeraBecquerels d'iode 131 (de 1961 à 1980) ce qui est de l'ordre de cinq fois moins que les émissions dues aux essais atmosphériques. En fait, ces relâchements pendant des essais souterrains sont concentrés sur trois tirs (deux en 1962 et un en 1970) qui, à eux seuls, sont à l'origine de plus de 90 % du total des émissions (rapport UNSCEAR 1993).

La dose collective efficace d'iode 131 due aux relâchements lors de ces essais serait de 5 homme.Sv (*ibidem*).

Les objectifs des essais souterrains pratiqués par les Etats-Unis et les contraintes qui étaient les leurs, très différentes de celles de la France en Polynésie, les ont amenés à réaliser leurs tirs dans des conditions différentes, outre le fait essentiel que la géologie des sites n'a rien de comparable (cf. supra : essais souterrains en Polynésie sur les effets géologiques comparés).

➤ Les tirs à usage pacifique

L'idée d'utiliser des charges nucléaires pour réaliser certains travaux de génie civil s'est concrétisée par neuf tirs d'excavation sur l'ensemble des sites américains dont six au Nevada. Mais pour l'ensemble de ces essais, le DOE donne une estimation de 35 tirs (du type « plowshare »). Cette technique a connu une application beaucoup plus étendue en URSS (cf. infra). Elle ne semble pas avoir été utilisée dans d'autres pays, ce qui en tout cas est une certitude pour la Grande-Bretagne et la France. Les avantages qui en étaient attendus se sont révélés largement compensés, et au-delà, par des inconvénients tels que les émissions de radionucléides, la contamination des sites, l'absence de maîtrise géologique des effets du tir, etc...

Selon les indications du DOE cité par Scope/59 (*op. cit.*), les deux tirs les plus puissants : « Sedan » (16 juillet 1967) et « Schooner » (8 décembre 1968) le dernier, les puissances étaient respectivement de 104 et 30 kt, à des profondeurs de 193 et 108 mètres ; la hauteur du nuage était d'environ de 4 000 mètres. Les autres tirs ont été en puissance d'une centième de Kilotonne à 2,3 kt.

Pour le tir « Sedan », UNSCEAR (Rapport 1993), la dose collective de la population locale (180 000 habitants) a été estimée à 3 homme.Sv. Pour l'ensemble des essais souterrains (militaires et à usage pacifique), cette dose serait de 5,7 homme.Sv. La dose collective du tir « Schooner », qui a donné lieu à des retombées totales mesurées aussi en Europe, est estimée à 20 hommes.Sv.

LES ESSAIS NUCLEAIRES SOVIETIQUES

A partir de son premier essai nucléaire atmosphérique à Semipalatinsk le 29 août 1949 jusqu'aux derniers tirs souterrains sur ce site et en Nouvelle-Zemble en octobre 1990, l'URSS a effectué au total 715 essais nucléaires sur deux sites principaux, quelques sites secondaires et nombreux autres sites où notamment eurent lieu une part importante des explosions dites « tirs à usage pacifique ».

Le nombre d'essais atmosphériques s'est élevé à 219 (197 pour les Etats-Unis) avec une puissance totale de 247,3 Mégatonnes (153,8 pour les Etats-Unis). Ces données chiffrées, pour les tirs atmosphériques, sont celles de l'UNSCEAR et recourent pour l'essentiel les sources spécialisées mais des différences de comptabilisation doivent être notées pour les tirs souterrains (cf. infra).

Ce n'est d'ailleurs que depuis une huitaine d'années que l'on dispose sur les essais soviétiques d'éléments d'informations qui vont au-delà des statistiques de tirs et des autres données de bases observables depuis l'extérieur du pays.

On a vu que pour l'ensemble des pays ayant pratiqué ou pratiquant des essais nucléaires, l'information s'est beaucoup ouverte au cours de la dernière décennie, notamment aux Etats-Unis. S'agissant de l'URSS, la situation de départ n'a rien de commun avec les trois pays occidentaux. Ainsi, pour ne prendre qu'un exemple, la ville de Kourchatov, siège des responsables et des services ayant en charge les essais nucléaires et le polygone de Semipalatinsk lui-même, ne figurait sur aucune carte. C'est d'ailleurs L. Beria lui-même qui avait été chargé par Staline d'encadrer l'ensemble des programmes, qu'il s'agisse de la production des dispositifs nucléaires ou des essais. C'est dire l'importance première de ce programme pour les autorités soviétiques de l'époque.

Si des informations sont maintenant disponibles, notamment sur le polygone de Semipalatinsk, qui a fait l'objet d'une étude préliminaire de l'AIEA, on ne peut disposer que d'éléments parcellaires sur bien des aspects, y compris les essais souterrains, les sources existantes étant de toute façon locales⁴⁹.

La consultation des données médicales et des registres d'état-civil entre 1949 et 1991 paraissent peu réalisables. Aucune étude ou même document

⁴⁹ A l'exception des tirs à Semipalatinsk après 1959, les autorités chinoises ayant mis en place en 1960 un dispositif de mesure des retombées qui affectaient leur territoire.

non élaboré datant de la période des essais atmosphériques ou des vingt sept ans qui ont suivi n'est à ce jour cité par les auteurs spécialisés.

Le polygone de Semipalatinsk étant situé sur le territoire du Kazakhstan, la demande d'expertise qu'a formulé auprès de l'AIEA en 1994 ce nouvel Etat issu de l'URSS a été à l'origine d'une ouverture et de la communication de la plupart des données actuellement disponibles.

Les travaux scientifiques russes communiqués au moment de la réalisation de cette étude, puis ceux de spécialistes étrangers, permettent de savoir les conditions dans lesquelles ont eu lieu les essais et certaines des conséquences environnementales et sanitaires qu'ils ont eues. Deux autres facteurs d'ordre politique y ont contribué et y contribuent encore.

En premier lieu, après une première décision de 1993, le gouvernement de la Fédération de la Russie a fait adopter en 1995 une loi étendant le bénéfice de ces mesures de compensation aux personnes ayant été exposées aux radiations dues aux essais sur le site de Semipalatinsk, mais ces dispositions visent les personnes qui ont été victimes des retombées, effectivement importantes, dans la région de l'Altai (ville principale : Barnaul), qui fait partie du territoire russe lui-même. Aussi, les travaux réalisés ou en cours depuis 1993 par les scientifiques russes portent-ils essentiellement sur l'Altai.

En second lieu, la coopération entre la Fédération de Russie et les Etats-Unis dans le domaine de la sécurité nucléaire est à l'origine de la diffusion d'informations substantielles ainsi qu'en atteste un ouvrage publié en 1997 : « *Derrière le rideau de fer : la gestion des déchets radioactifs dans l'ex Union Soviétique* »⁵⁰. Cet ouvrage centré en fait sur l'ensemble des problèmes posés par le nucléaire consacre une vingtaine de pages aux essais nucléaires.

Enfin, les travaux réalisés dans le cadre du rapport de l'AIEA ont permis de connaître certaines contributions à travers des publications ; par exemple celles de MM. C. Chenal et D. Robeau de l'IPSN (le polygone d'essais nucléaires de Semipalatinsk-Kazakhstan)⁵¹.

L'approche des essais nucléaires soviétiques montre par ailleurs que si les conséquences de ceux-ci ont été importantes, à partir du site de Semipalatinsk, elles semblent sur le plan humain avoir eu des effets moins considérables que ceux des catastrophes liées aux activités nucléaires civiles ou militaires, mais qui sont hors du champ de la présente étude : Krasnoïarsk, usine de Kyshtym (1957), Tchernobyl (1986), Tomsk (1993), les naufrages de huit sous-marins nucléaires, sans parler des rejets de déchets radioactifs dans les fleuves sibériens.

⁵⁰ Ouvrage réalisé par Pacific Northwest National Laboratory/Institut Battelle pour le Département de l'énergie des Etats-Unis, coordonné par M. Donald J. Bradley, Editeur David R. Payson/Battelle Press.

⁵¹ In Catastrophes et accidents nucléaires dans l'ex Union Soviétique – IPSN – coordinateur M. Daniel Robeau – Ed. EDP – Sciences 2001

Après une approche d'ensemble des essais en Union Soviétique, on présentera, comme la logique du sujet l'exige, le déroulement des faits et leurs conséquences connues site par site. Ici comme ailleurs, le développement de la technologie explique les évolutions, notamment la diversification des sites.

I - L'ensemble des essais soviétiques

Si le site de Semipalatinsk a été créé le premier en 1946, il a été utilisé jusqu'en 1962 pour les essais atmosphériques et jusqu'en octobre 1990 pour les essais souterrains.

A partir de 1955, le site de Nouvelle-Zemble, situé dans l'océan Arctique, fut en activité et c'est là qu'eurent lieu les tirs de très forte puissance. Dix essais eurent lieu depuis Kapustin Yar (Sud de l'Oural confins de la mer Caspienne), le dispositif étant tiré dans ce cas depuis un missile en altitude. Deux essais eurent lieu dans d'autres sites aux confins de la Russie et du Kazakhstan (Totsk et Aralsk). De nombreux autres lieux, en dehors de ceux qui viennent d'être cités, furent le théâtre d'explosions nucléaires : 129 sur 715. La répartition géographique de ces lieux est donnée par la carte ci-après. En effet, au-delà des essais militaires proprement dits, l'URSS pratiqua des « tirs à usage pacifique » dont le nombre n'est pas déterminé avec exactitude : de 120 à 156 selon les auteurs, ce chiffre s'imputant sur les 715 essais totaux. Il y a lieu enfin d'indiquer que le nombre de charges et de dispositifs nucléaires est plus élevé que le nombre d'essais : 796 pour 559 essais militaires, 173 pour 156 tirs à usage pacifique. Cet écart n'est pas expliqué si ce n'est d'une façon partielle par le tir de plusieurs charges simultanément ou par des expériences de sécurité. L'ouvrage précité Scope/59 (Nuclear Test Explosions) indique que les 254 charges tirées simultanément expliquent que le chiffre de 969 essais nucléaires soit parfois cité.

➤ La puissance totale de l'ensemble des tirs (atmosphériques et souterrains) s'élève à 285,39 Mégatonnes répartie géographiquement ainsi :

Semipalatinsk	17,42 Mt
Nouvelle-Zemble.....	265,34 Mt
Kapustin Yar, Totsk, Aralsk...	1,03 Mt
Sites industriels et autres	1,60 Mt

La répartition des **seuls tirs atmosphériques** par site d'essais (puissances et retombées) est donnée par le tableau ci-après :

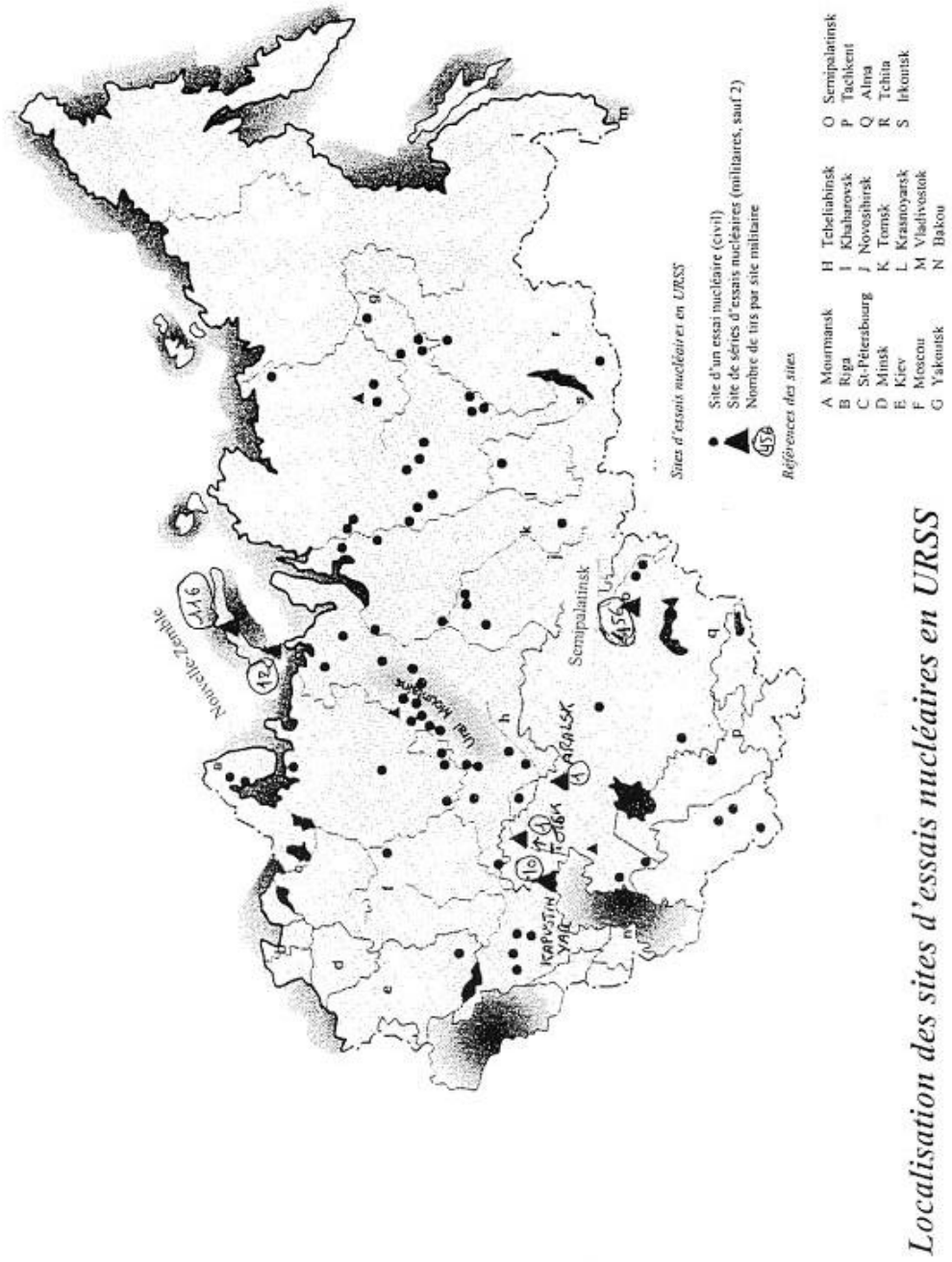
Site d'essais	Nombre d'essais	Puissance (en Mégatonnes)			Répartition de la puissance de fission (en Mégatonnes)		
		Fission	Fusion	Total	Localement et régionalem ¹	Dans la troposphère	Dans la stratosphère
Semipalatinsk	116	3,74	2,85	6,59	0,097	1,23	2,41
Novaya Zemlya	91	80,8	158,8	239,6	0,036	2,93	77,8
Totsk, Aralsk	2	0,040	0	0,040	0	0,037	0,003
Kapustin Yar	10	0,68	0,30	0,98	0	0,078	0,61
Total	219	85,3	162,0	247,3	0,13	4,28	80,8

Source : Rapport UNSCEAR 2000, page 205, annexe C

➤ La répartition par catégorie d'essais est donnée par le tableau ci-après :

Tirs atmosphériques, sous marins et dans l'espace	
Explosions aériennes	177
Explosions à la surface du sol.....	32
Explosions sous-marine et à la surface de la mer.....	5
Explosion dans l'espace	4
Explosion en haute altitude.....	1
Total.....	219
Tirs souterrains	
En tunnel.....	245
En puits (dont 5 de cratère).....	251
Total	496

Ces données (source : Donald J. Bradley/Battelle op. cit.) appellent quelques précisions terminologiques : les tirs souterrains sont effectués « sous le niveau du sol » à une profondeur très variable et ne sont pas nécessairement confinés ; ce n'est d'ailleurs pas le but recherché dans certains tirs du type « cratère » par exemple. Cela est à rapprocher de tirs dits sous-marins, effectués à 30 m du fond de la mer (Nouvelle-Zemble ou tirs américains aux îles Marshall).



II - Le site de Semipalatinsk

1. Le site lui-même

Le site de Semipalatinsk au Kazakhstan fut envisagé à partir de 1946 pour les essais nucléaires. Le polygone chevauche les limites de trois « oblasts » (régions) au Kazakhstan : Semipalatinsk, Pavlodar et Karaganda (cf. carte ci-après) et est proche de la frontière de ce qui est devenu la Fédération de la Russie (ex RSFSR). D'une surface de 18 000 km² il s'étale sur 180 km du nord au sud et 140 km d'est en ouest. La ville de Kouchatov située à la limite Nord-Est du polygone était la base des personnels militaires, scientifiques et logistiques chargés des essais et comptait 30 000 personnes (un peu plus de 10 000 actuellement depuis la fermeture du polygone en 1991 et le départ de l'armée russe).

D'après l'AIEA, outre Kourchatov, deux hameaux dans la partie nord du polygone étaient habités à l'époque, une population d'environ 30 000 à 40 000 personnes vit actuellement à la périphérie immédiate dans la zone située sur la trajectoire des retombées et sur le polygone lui-même.

Sur le site lui-même, dont le caractère géographique est celui d'une vaste plaine steppique à 1 000 m d'altitude environ, ont été implantés trois réacteurs nucléaires souterrains de recherche (dont l'un en 1961 et l'autre en 1975), dont l'un était peu éloigné du point zéro principal des tirs atmosphériques. Le dernier de ces réacteurs aurait cessé de fonctionner en 1996. Des immeubles, maisons, structures d'usines, équipements de chemin de fer, ouvrages d'art, métro avaient été construits dans un rayon d'une vingtaine de kilomètres à partir du point zéro, afin d'apprécier concrètement les effets des explosions nucléaires.

2. Les caractéristiques des essais atmosphériques

Le premier tir a été celui de la première bombe atomique soviétique le 28 août 1949 (22 kt), le dernier tir atmosphérique, celui du 24 décembre 1962 (0,028 kt). Les deux essais les plus puissants sont ceux de la première bombe thermonucléaire du 12 août 1953 (400 kt) et celle à haute altitude du 22 novembre 1955 (1,6 Mt).

Plus de la moitié des essais atmosphériques soviétiques ont eu lieu à Semipalatinsk pour une puissance de 6,4 Mégatonnes, très faible par rapport à l'ensemble des essais soviétiques (247,3 Mégatonnes). Sur les 122 essais recensés

par C. Chenal⁵², 35 ont été effectués sur des tours de 30 m de haut, technique beaucoup plus contaminante que celle aérienne utilisée pour les 87 autres essais. Les deux techniques ont été utilisées concomitamment et non successivement comme dans d'autres pays mais il apparaît que les tirs sur tour, lorsqu'ils ont été pratiqués au cours des dernières années, l'étaient pour des puissances extrêmement faibles (à l'image du dernier tir de 1962). La radioactivité dispersée dans l'atmosphère à la suite de ces tirs a été estimée à $6,7 \cdot 10^{15}$ Bq pour le césium 137 et $3,7 \cdot 10^{15}$ Bq pour le strontium 90 (le total de rejet estimé des essais soviétiques s'établissant respectivement à $1,8 \cdot 10^{17}$ et $1,2 \cdot 10^{17}$ Bq).

Une grande partie des retombées qui ont eu lieu loin, voire très loin du site, trouve son origine dans 24 tirs dont 13 tirs sur tour. Les principales contributions aux retombées radioactives locales et régionales seraient dues⁵³ à cinq tirs dont celui de 1949 et celui du 12 août 1953, le dernier le 24 août 1956 (24 kt). D'autres auteurs ajoutent à cette liste, plus spécialement pour les retombées concernant l'Altaï, trois tirs du début 1962.

On ne dispose que de peu d'indications sur les conditions météorologiques dans lesquelles les essais se sont déroulés, celles-ci, comme l'ensemble des informations relatives à ces essais, ayant été classifiées jusqu'en 1991. Certains éléments sur le premier tir (27 août 1949) montreraient qu'il s'est déroulé dans de mauvaises conditions.

3. Les caractéristiques des essais souterrains

Il doit être rappelé que l'expression «essais souterrains » regroupe des catégories de tirs très différentes : les essais qui sont confinés, ceux qui ne le sont pas (soit involontairement, soit volontairement lesquels comprennent dans ce cas les tirs de cratère (au nombre de quatre pour ces derniers) à Semipalatinsk selon l'AIEA (cinq selon d'autres sources).

⁵² C. Chenal Le polygone d'essai nucléaire de Semipalatinsk. Op. cit.

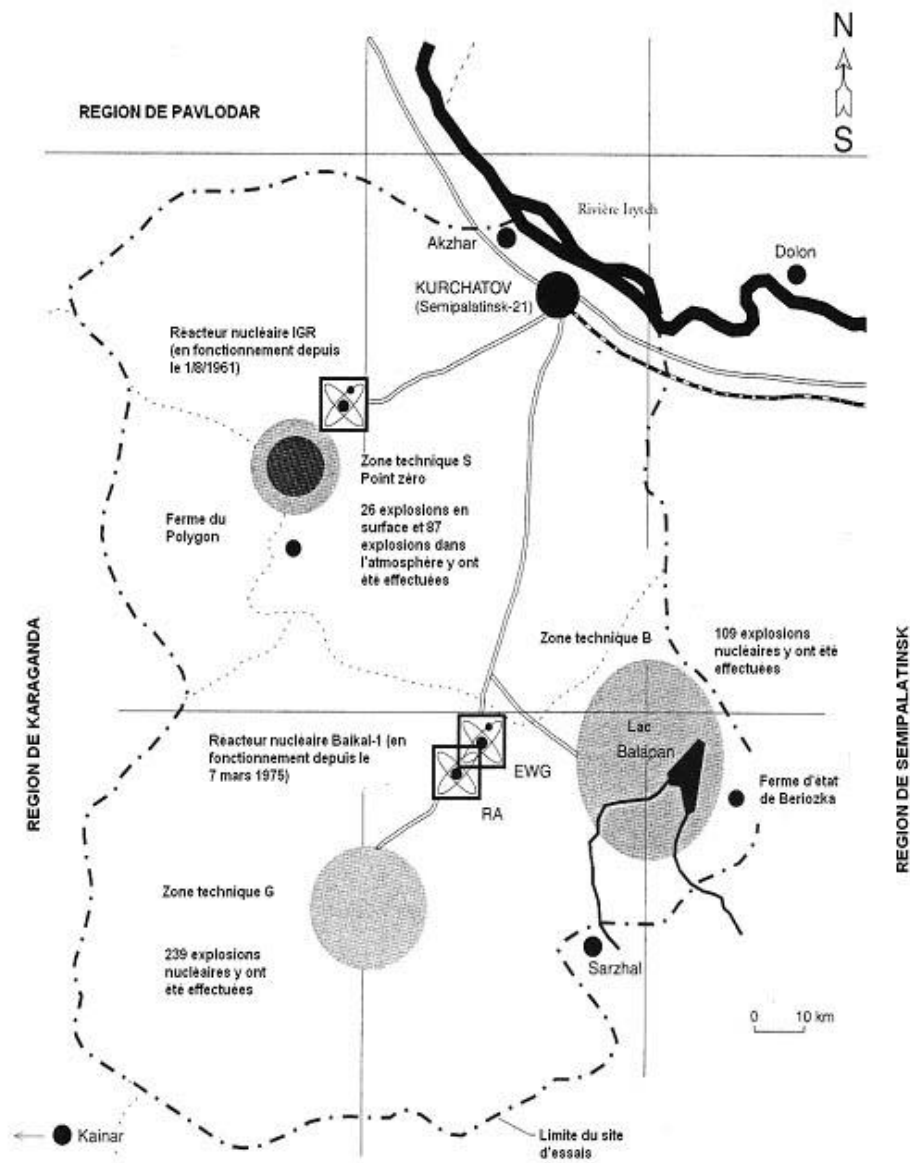
⁵³ Dubasov et al. 1994 cité par Nuclear Test Explosions Scope (59)

Le rapport de l'AIEA apporte les précisions suivantes sur l'ensemble des essais à Semipalatinsk et notamment sur les souterrains.

Formations géologiques prédominantes dans la zone d'essai

Site technique et situation géographique	Période des essais		Géologie dominante de la zone d'essais	Nombre d'essais
Site technique S Point zéro N 50° 26' E 77° 59'	Premier tir Dernier tir	29-8-1949 24-12-1962	Grès	Surface : 26 Air : 87
Site technique G ^a Degelen Mountain N 49° 46' E 77° 59'	Premier tir souterrain Dernier tir	11-10-1961 04-10-1989	Massif rocheux montagneux composé de granit, quartz-porphyre et syénite	En galeries de mines : 215
Site technique G ^a Degelen Mountain N 49° 59' E 77° 38'	Premier tir souterrain Dernier tir	10-10-1965 04-04-1980	Alévolite, porphyre, grès	En puits : 24 (y compris un relevant du programme de tirs à des fins pacifiques dans le puits Sary-Uzen)
Site technique B Balapan N 49° 43' E 78° 29'	Premier tir souterrain Dernier tir	21-10-1968 12-11-1968	Argillite	En puits : 2 (tirs de cratère du programme de tirs à des fins pacifiques dans le puits Tel'kem and Tel'kem2)
Site technique B Balapan N 49° 56' E 78° 29'	Premier tir souterrain Dernier tir	15-01-1965 19-10-1989	Alévolite, grès, aggloméré	En puits : 107 (y compris le tir à des fins pacifiques qui a créé le lac Balapan)

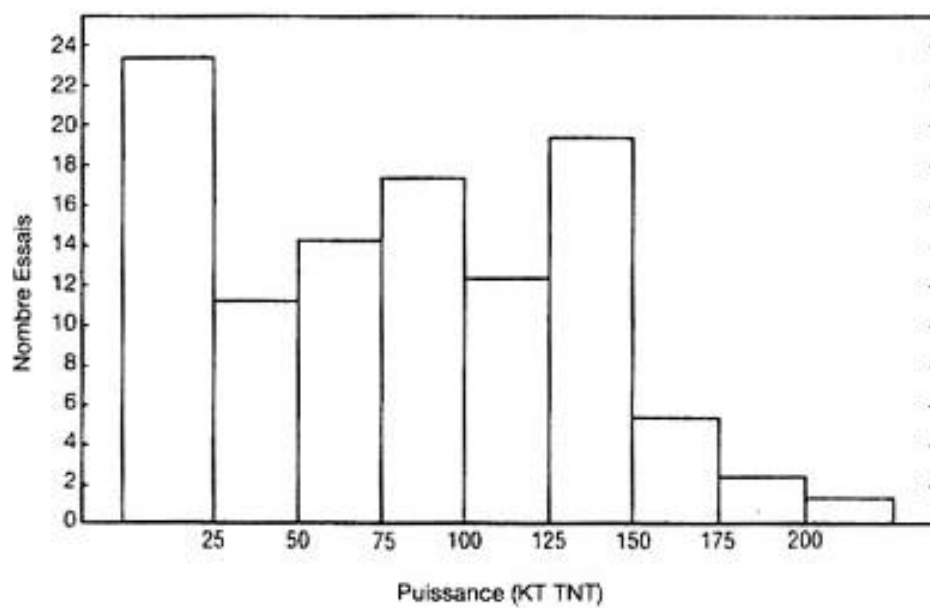
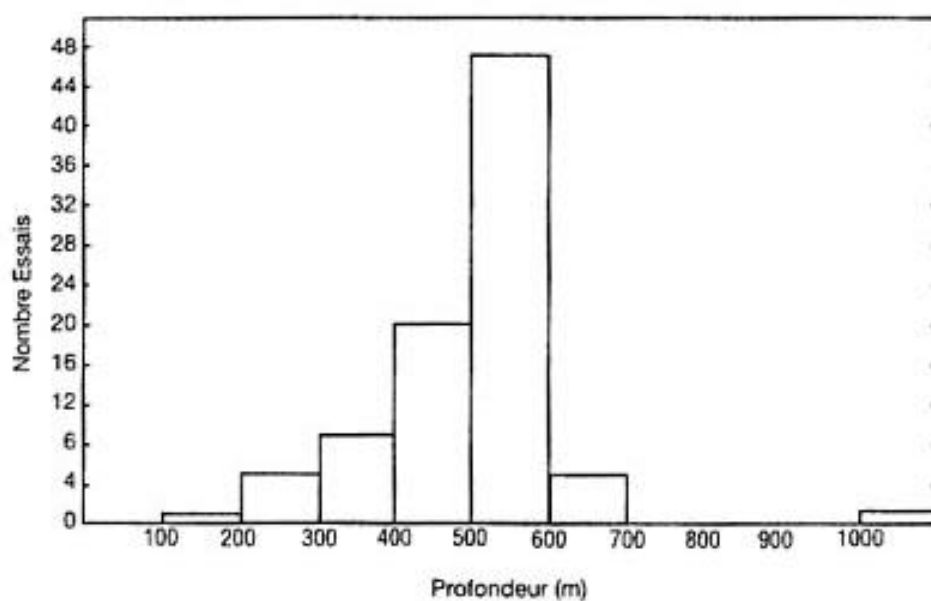
La carte générale du rapport de l'AIEA donne la localisation de l'ensemble des tirs et des installations techniques du polygone :



PLAN DU SITE D'ESSAIS DE SEMIPALATINSK

3.1. Les essais souterrains proprement dits

Les essais souterrains d'armes nucléaires ont eu lieu en galeries horizontales ou dans des puits forés spécifiquement. Les galeries sont estimées au nombre de 127 pour la zone technique G (monts Degelen) où 239 tirs ont eu lieu ; leur longueur va jusqu'à un kilomètre. Les puits, plus particulièrement pratiqués dans la zone technique B (lac Balapan) ont une profondeur de 400 m à 600 m pour la plupart (cf. figure ci-dessous extraite de l'article cité de C. Chenal – IPSN op. cit.). *« Sur 125 essais dans cette zone, 120 peuvent être considérés comme réellement souterrains ».*



Nombre d'essais souterrains d'armes en fonction de la puissance et de la profondeur

Les deux techniques semblent avoir été pratiquées concurremment dans le temps même si les tirs en puits ont été nettement majoritaires en fin de période.

Selon le même auteur : « Durant la période des essais souterrains, une exposition externe de la population a pu être occasionnée à la suite de treize fuites, en raison de fracturation du terrain, libérant dans l'atmosphère $7,4 \cdot 10^{14}$ à $1,5 \cdot 10^{15}$ Bq (3 à $4 \cdot 10^4$ Ci) de ^{137}Cs et $9,25 \cdot 10^{13}$ à $1,85 \cdot 10^{14}$ Bq ($2,5$ à $5 \cdot 10^3$ Ci) de ^{90}Sr .

Cependant, aucune contamination résiduelle n'a été mesurée. Dans 60 % des tirs, un rejet de gaz rares a été observé dans l'atmosphère, entraînant une augmentation passagère de l'activité atmosphérique. Le 12 février 1989, 3 à 5 heures après un essai souterrain, le débit de dose à Tchagan, situé à 60 km du site était de 23mSv par heure. L'exposition consécutive à cet « accident » estimée à 50mSv a été considérée comme négligeable ».

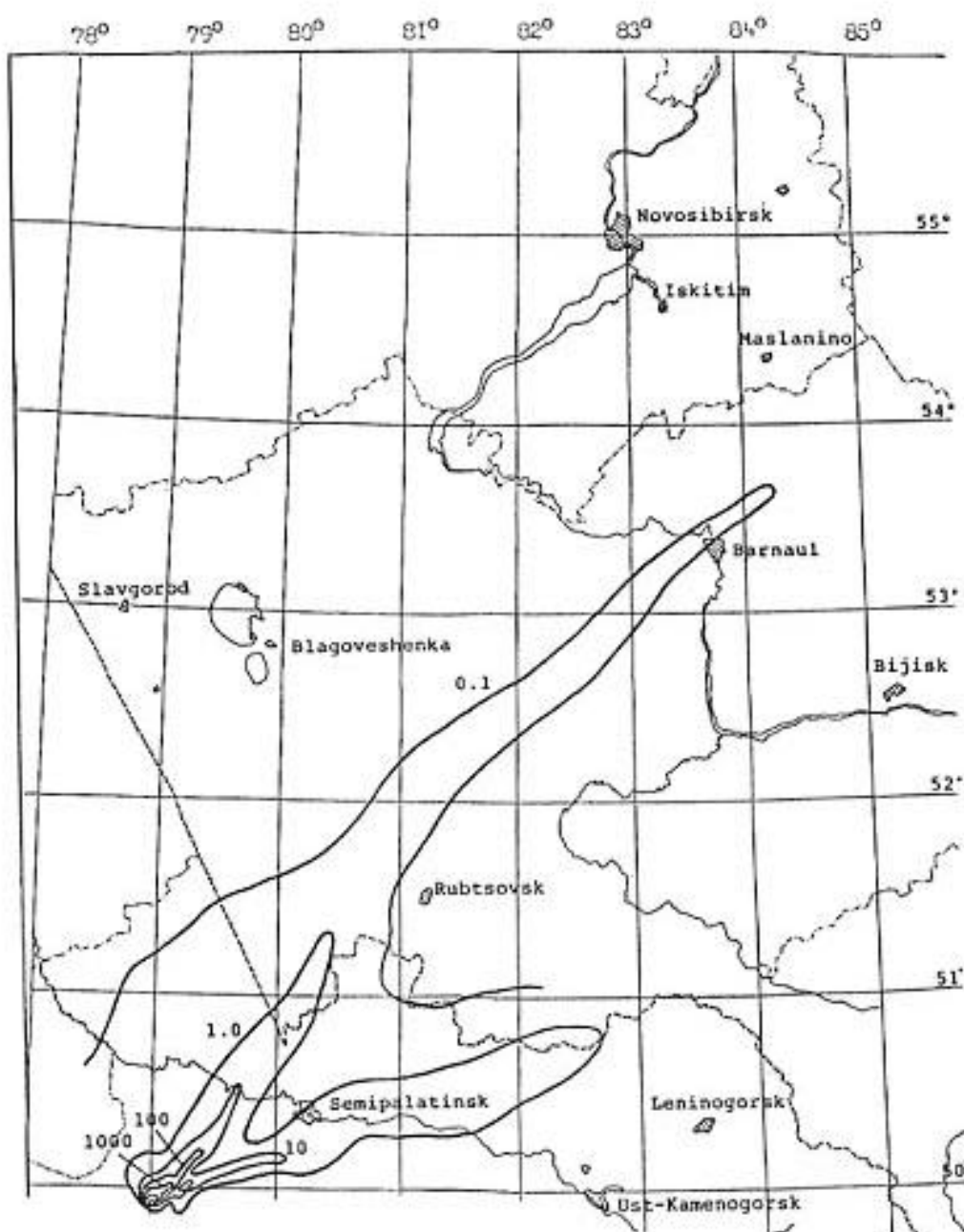
De son côté, M. Donald J. Bradley indique (op. cit. page 509) que « l'ensemble des essais souterrains (y compris les tirs à usage pacifique), 50% des tirs ont été complètement confinés, relâchant des gaz contenant des radionucléides à vie courte, et 1% a projeté des débris de sol dans l'atmosphère »; il apporte en outre (page 511) des précisions concrètes sur les effets des tirs souterrains, notamment pendant la période la plus récente : « Jusqu'en 1980, les essais nucléaires souterrains du site d'essais de Semipalatinsk ont été effectués peu profondément ; toutefois, même les essais en grande profondeur sont connus comme ayant entraîné une contamination radioactive. Le 7 mai 1987, le niveau des radiations à Semipalatinsk, se trouvant à 90 km du site d'essais, atteignait 350 à 500 $\mu\text{R/h}$ après une explosion en profondeur. Un milieu radioactif élevé a également accompagné les essais souterrains dans les zones adjacentes de la région d'Altaï (13 février 1989, jusqu'à 170 $\mu\text{R/h}$ dans le secteur d'Uglovsky et 200 à 250 $\mu\text{R/h}$ le 14 et 15 février 1989, dans les villes de Kulunda et Slavgorod). L'essai de novembre 1987 (jusqu'à 150 kilotonnes) entraîna six ruptures dans le réseau d'alimentation thermique de la ville de Gornyak (Bulatov 1993) ».

De son côté, l'UNSCEAR avait donné dans son rapport de 1993 (annexe B) des indications relevées à l'extérieur des frontières de l'URSS : « Des traces de radionucléides à vie courte résultant des essais soviétiques ont été relevées en Finlande et en Suède en 1966 et en 1971. La dose collective de la population suédoise à partir d'un tir souterrain ayant donné lieu à des fuites dans l'atmosphère à partir de Semipalatinsk en 1966 était estimée à 3 homme.Sv et à 0,1 homme Sv ou moins en sept autres cas ».

3.2. Les tirs d'excavation (ou de cratère)

➤ Les cinq tirs d'excavation pratiqués sur le polygone de Semipalatinsk relèvent du programme de tirs à usage pacifique qui en a compté 124 au total répartis à travers l'ensemble de l'URSS.

➤ Le premier essai de ce type (pour toute l'URSS) a eu lieu le 15 janvier 1965 et avait pour objet de créer un lac artificiel à l'aide d'une charge de 140 kt qui a été tirée volontairement avec un rendement de 7% (environ 10 kt). Placé à 175 mètres de profondeur du fond d'un puits dans un terrain de grès légèrement humide avec un mélange de schiste et de lignite glaiseuse. Cette explosion a créé un cratère de 100 m de profondeur et d'un peu moins de 500 m de diamètre. Le lac artificiel ainsi créé dans ce cratère est situé au confluent de deux rivières dont la Tchagan qui a aussi donné son nom au lac et au tir. Le trait caractéristique de cette explosion a été le surgissement d'un nuage de terre en forme de bulbe d'un diamètre de 5km et atteignant une hauteur de 2 500 mètres et s'étendant vers le nord-est (vers l'Altai). La répartition du nuage avec les isodoses est donnée par la carte ci-dessous (extraite de Nuclear Test Explosions - Scope/59, op. cit. page 75).



*Carte de la répartition des niveaux de doses après l'explosion du tir d'excavation « Chagan »
(15/1/1965) en mR h⁻¹, après vingt-quatre heures*

M. C. Chenal (op. cit.) indique « *que le débit de dose sur les berges de ce lac varie, suivant les endroits, de 10 à 70 µSv/heure (...) Il redevient normal à un kilomètre des berges sauf au nord où une tache de contamination subsiste (7 400 à 11 100 Bq/m²)* ».

Le même auteur complète ainsi les informations sur les quatre autres tirs : « *Un second lac – le lac Telkem – a été creusé artificiellement le 21 octobre 1968 à l'aide de trois « petites bombes » de 0,2 kt chacune. Aujourd'hui encore, les débits de dose y sont de l'ordre de 10 µSv par heure. Ce petit lac se trouve à 15 km du village de Sargal, 1 500 habitants. Le cinquième tir d'excavation a été effectué dans la partie sud-ouest du polygone non loin du village d'Inguedeboulak* ».

Les mesures, notamment celles relatives au tir Chagan, ont été réalisées d'une part à l'époque où ces essais, particulièrement dans les heures et jours qui ont suivi, puis ultérieurement, en 1990, par des relevés aérogammamétriques.

➤ Les analyses des différents spécialistes convergent pour constater le caractère fortement contaminant de ces tirs, Chagan notamment. La situation récente (1990-1994) du polygone a donc fait l'objet de mesures de la contamination des sols y compris par relevés aérogammamétriques. Ces éléments sont présentés avec les résultats de l'étude préliminaire de l'AIEA sur les conditions radiologiques actuelles du site de Semipalatinsk.

4. Les éléments de mesure des retombées

Une précision méthodologique s'impose préalablement : compte tenu de l'existence de nombreux tirs souterrains non confinés sur une portion étendue du polygone de Semipalatinsk, le partage entre les retombées des essais atmosphériques et des souterrains au sens général de ce terme, ne peut pas être fait.

4.1. L'exposition externe

Les estimations d'exposition externe dont on dispose, essentiellement à partir de travaux de scientifiques russes et kazakhs réalisés depuis 1990, donnent des appréciations partielles mais assez représentatives sur les tirs les plus contaminants. Les éléments présentés concernent géographiquement le site, ses abords immédiats et les régions touchées jusqu'à 500 km environ, principalement vers l'Altai.

➤ Une indication ponctuelle sur les mesures des retombées de la première période des tirs et sur l'appréciation des risques à l'époque est donnée par Bulatov (1993) cité par D. J. Bradley (op. cit. page 509) :

« *Le premier essai nucléaire soviétique, d'une puissance de 22 kilotonnes, fut effectué à Semipalatinsk le 29 août 1949. Après les retombées radioactives locales, le taux de la dose radioactive dans le village de Dolon s'élevait à 200 R/hr, dans le village de Kara-Aul, le taux atteignait 250 R/hr, et à Sarzhal et Kaynar 150 R/hr. On fit retourner les habitants, qui avaient été relogés, le neuvième jour à Kara-Aul et le dix-*

neuvième jour à Kaynar et Sarzhal bien que le taux de la dose de radiation soit encore très élevé (25-60 mR/h). Une estimation des doses de rayonnements gamma s'élevait de 40 à 80 R/h près de l'axe du nuage des retombées radioactives dans le sud-est de la région avec une diminution progressive le long de la rivière Alay vers Barnaul-Zarinsk et au-delà vers l'oblast de Kemerovo. Différents rayons (secteurs) de l'Altay kray (région) reçurent des doses d'exposition aux rayonnements variant de 90 à 300 rems. Dans certaines villes habitées, la dose d'exposition pendant les trois premières années des essais dépassa 100 R. Au même endroit, le 12 août 1953, on fit exploser un engin de 500 kilotonnes et la population de 200 zones habitées situées autour du site d'essais fut relogée. Après l'essai, le taux de la dose sur la terre dans ces zones atteignit 150 à 250 R/hr et les gens furent autorisés à rentrer chez eux le neuvième jour (Bulatov 1993) ».

➤ Une estimation ponctuelle pour l'Altai a été réalisée par Barkovski et al. (1995) cité par Scope/59 Nuclear Test Explosions ; elle donne les doses extérieures en mSv pour trois types de mode de vie (village de Veseloyarsk) pour le seul tir du 29 août 1949.

Durée d'intégration des doses	Vie en plein air	Fermier	Travailleur en intérieur
Pendant le passage du nuage	7,9	1,8	1,2
Pendant le premier jour.....	104	61	21
Pendant les 3 premiers jours	146	85	18
Au-delà.....			
Dose totale	305	189	61

Une autre source citée par Scope/59 Nuclear Test Explosions (op. cit.) évoque pour certains secteurs du sud-ouest de l'Altai des doses de 2500 mSv (Laborev et al.), la dose collective étant de 32 000. Plus de 70 % de la dose externe aurait été reçue pendant le premier mois après les retombées, dont 50 % pendant les quatre premiers jours. 48 des tirs atmosphériques ont affecté par leurs retombées la région de l'Altai. Le nombre de personnes recensées à ce jour par le programme «Site d'essais de Semipalatinsk-Altai» de la Fédération de Russie s'élève à 40 235.

➤ M. Anatoly Tsyb en 1990, alors directeur de l'Institut de recherches en médecine radiologique de l'Académie des sciences de l'URSS, rendit un rapport sur la situation du site de Semipalatinsk et au-delà. Il en ressortait que 10 000 personnes sur 85 000 habitants dans les environs du site avaient été exposés aux radiations (sur la période de 1949 à 1963 essentiellement). On évalua à 3 500 le nombre de personnes ayant reçu des doses de 20 à 37 rem, 1900 de 2 à 20 rem, le reste à moins de 2rem ; dans le cas le plus extrême, les 90 habitants du village de Dolon auraient reçu des doses

allant jusqu'à 160 rem. Au-delà du site, dans l'Altaï (à plusieurs centaines de kilomètres), la dose a été de 600 mSv pour le seul tir du 29 août 1949, 20 à 30 mSv pour celui du 7 août 1962.

➤ Le rapport présenté à l'AIEA en 1994 par MM. Dubasov et Matoushenko tire des corrélations assez voisines du précédent en indiquant que les populations les plus atteintes auraient été celles de la ville de Semipalatinsk (distante de 120 km du point zéro), de Pavlodar et de l'Altaï.

➤ Le rapport du Professeur Gusseïv, directeur de l'Institut de radioécologie (1997) est cité dans ces termes dans l'article précité de M. Christian Chenal (revue de l'IPSN) (cf. carte couleur en annexe).

« L'Institut de radioécologie dirigé par le Pr Gussiev a fait état de cartes dosimétriques montrant clairement les directions vers lesquelles les panaches radioactifs se sont déplacés. La carte montre les lignes isodoses pour les tirs ayant entraîné les expositions les plus importantes. On peut y observer les surfaces délimitées par des lignes isodoses allant de 600 mSv à 1 mSv.

Durant le tir ayant entraîné les expositions les plus importantes, celui du 29 août 1949, le débit de dose maximum, 250 mSv/h, a été mesuré à 5 km du pas de tir. Les populations situées à l'extérieur du site ont été soumises à un débit de dose de l'ordre de 100 à 150 mSv/h et auraient reçu, au total, de l'ordre de 600 mSv (...)

Les populations touchées par exposition externe peuvent être clairement identifiées. Il s'agit de celles des villages et petites villes de Kainar, Sargal, Karaul, Dolon situées à proximité du polygone, et des villes de Semipalatinsk, Oust-Kamenogorsk et Barnaul situées entre 150 et 500 km du pas de tir.

Pour neuf autres tirs considérés comme ayant entraîné des expositions significatives, aucune information suffisamment précise n'est disponible. À la suite du test du 29 août 1949, la dose délivrée à la population est estimée à 1 340 mSv à Dolon, 130 mSv à Mostic, 240 mSv à Lokot. Concernant l'explosion du 12 août 1953, la dose estimée à la population est de 420 mSv à Sargal et a pu atteindre 400 mSv à Karaul chez 191 personnes restées dans la ville malgré l'ordre d'évacuation de la population. Dans la plupart des cas, les doses reçues par la population, essentiellement dues à la composante externe, ont été délivrées pour près de 90 % le mois suivant ».

➤ L'ouvrage précité de Sir F. Warner et René J.C. Kirchmann (Scope/59 Nuclear Test Explosions) résume ainsi l'évaluation de la contamination humaine : « Au cours des essais nucléaires atmosphériques, une moyenne de 344 000 résidents, essentiellement dans la région de Semipalatinsk, ont été exposés au rayonnement. Une moyenne de 28 000 personnes ont reçu des doses de plus de 1 Sv provenant de passages de nuages radioactifs et de retombées radioactives au sol (cf. tableau ci-après). Après 1962, seule cette population exposée a fait l'objet de recherches « tous azimuts » sur les effets des rayonnements à court et long terme. Une moyenne de 37 200 résidents de la

région de Semipalatinsk auraient pu recevoir des doses de 0,35 à 1,00 Sv. La majorité de la population, soit 280 000 personnes, a reçu des doses allant de 0,07 à 0,35 Sv ».

*Population autour du site d'essais de Semipalatinsk
Et répartition par tranche de doses*

Equivalent de dose (mSv)	Population (10 ³)	Age	
		0-19 ans	20 ans
> 1000	28,0	14 560	13 440
350-999	37,2	17 856	19 344
70-349	157,0	81 640	75 360
< 70	222,0	113 220	108 780
Total	344,0	161 120	182 880

Le chiffre minimal de 300 000 personnes surexposées aux radiations est confirmé par d'autres spécialistes.

4.2. L'exposition interne

Les estimations sur ce point sont à la fois beaucoup plus rares et assez divergentes. L'exposition interne est donnée comme marginale par certains, proche voire plus élevée que l'exposition externe par d'autres.

Une source kazakh de 1997 citée par Scope/59 Nuclear Test Explosions fournit les éléments suivants pour les populations du Kazakhstan vivant à proximité du site d'essais durant la période 1949-1962 :

Doses estimées d'irradiation externe et interne reçue par les populations dans et autour du site de 1949 à 1962

District ou ville	Population 1960	Dose externe moyenne (mSv)	Dose interne moyenne (mSv)	Dose totale moyenne (mSv)
Abay district:				
Karaul	2335	357.9	520	880
Sarzhai	832	1163.3	1300	2460
Beskaragay district:				
Budene	325	1679.4	1800	3480
Dolon	906	2174	2300	4470
Kanonerka	1227	840.9	950	1790
Mostik	637	12.7	9.9	23
Tcheremushky	531	152	110	260
Zhanasemey district:				
Sarapan	187	~ 400	~ 400	~ 800
Znamenka	903	~ 400	~ 400	~ 800

Plus largement, comprenant aussi des villes plus éloignées, le tableau ci-dessous (Laborov et al. cité également par Scope/59 Nuclear Test Explosions) donne l'estimation des doses efficaces à la thyroïde reçues pour l'ensemble des essais dans le polygone par les habitants de la ville de Semipalatinsk, de celle d'Ust-Kamengorsk (située un peu plus loin que cette dernière), de Kurchatov à la périphérie du site et de Chagan, lieu dit sur le site où ont eu lieu des tirs d'excavation :

Doses efficaces à la thyroïde reçues sur le site et en périphérie

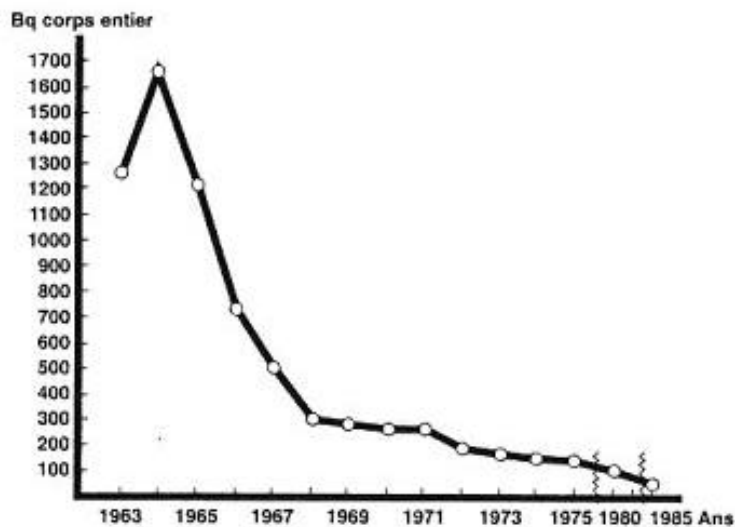
Localités	Adultes, dose à la thyroïde, mGy	Dose efficace, mSv
Semipalatinsk	28	4
Ust-Kamenogorsk	180	36
Kurchatov	310	58
Chagan	650	230

Ces sources ne fournissent pas d'indications sur les doses à la thyroïde auxquelles ont pu être exposés des enfants qui sont, et de beaucoup, les sujets qui courent le plus de risques avec les retombées d'iode 131 (cf. essais du Nevada). Toutefois, le rapport Tsyb donne quelques estimations de 2 à 6 Gy pour la période

1949-1953. Une autre source (Rosenson et al.)⁵⁴ indique que des doses de 20 000 mSv à la thyroïde d'iode 131 auraient été atteintes notamment avec le tir du 7 août 1962.

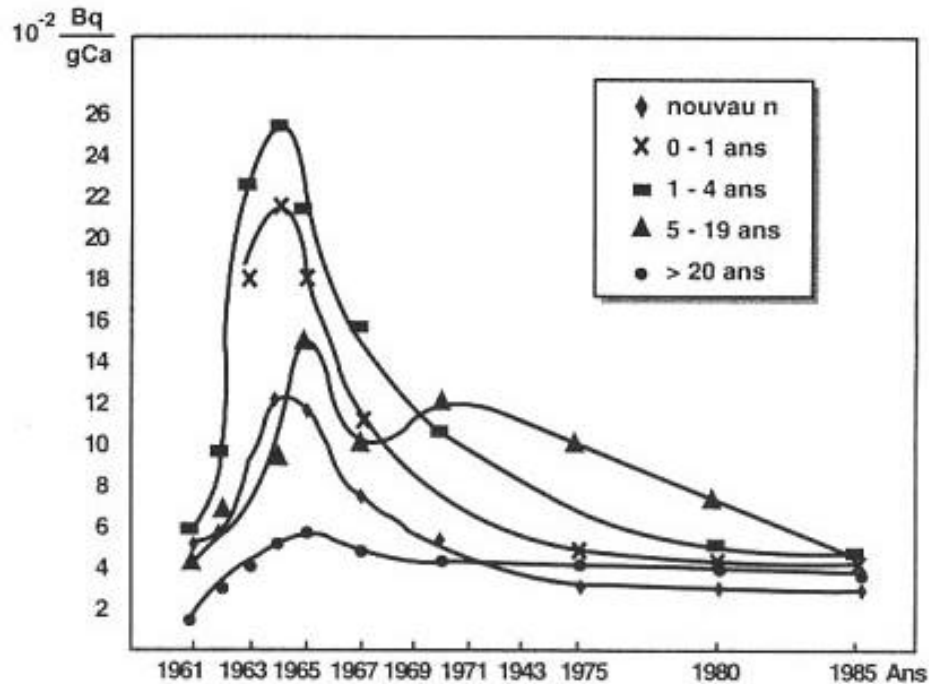
L'UNSCEAR lui-même dans son rapport 2000 (op. cit.) indique (page 175) que « la dose absorbée à la thyroïde par l'ingestion d'iode radioactive est très incertaine mais est estimée à un niveau aussi élevé que 8Gy pour des enfants au hameau d'Akbulak ». Le niveau très élevé de telles doses, s'il est avéré, n'a pu qu'avoir des effets graves dont on ne trouve guère de mention. L'UNSCEAR conseille la prudence dans l'interprétation des résultats sur le Kazakhstan et l'Altaï en notant les décalages entre les résultats pour ces deux régions.

Sous ces réserves, et compte tenu du caractère limité des deux documents par la période qu'ils couvrent (pas de données antérieures au début des années soixante) et par l'amplitude géographique (« dilution » des effets des retombées par la prise en compte de celles l'ensemble de la population de l'URSS et non des zones contaminées) les deux graphiques ci-après donnent un aperçu de l'évaluation de la dose d'irradiation interne moyenne reçue par la population d'URSS (rapport présenté en 1994 par M. Barkhodanov cité par MM. D. Robeau et C. Chenal, op. cit.)



Evolution de l'incorporation moyenne de ¹³⁷Cs dans l'organisme humain en Union Soviétique entre 1963 et 1985

⁵⁴ R. Rosenson, B. Gusseïv, M. Hoshi, Y. Satow (1996) : sommaire résumé des études sur les radiations sur les habitants de la région de Semipalatinsk de 1953 à 1997. Symposium de Nagasaki – Elsevier cité par Scope/59.



Evolution de l'incorporation moyenne de ^{90}Sr , par gramme de calcium, dans l'organisme humain et par tranche d'âge en Union Soviétique entre 1961 et 1985

5. Les conséquences sanitaires

5.1. Approche générale

Près de quarante ans après les derniers essais atmosphériques et une douzaine d'années après la fin des essais souterrains, à la lumière des éléments relatifs aux retombées qui viennent d'être indiqués, il est très difficile de fournir des indications concrètes même ponctuelles (cf. rapport de l'UNSCEAR).

L'ouvrage « Nuclear Test Explosions - Scope/59 » (op. cit.) indique en ces termes qu'une recherche avait été engagée entre 1957 et 1960 :

« Peu de résultats de recherches ont été publiés concernant les effets des essais nucléaires sur la santé de la population à la périphérie du polygone de Semipalatinsk au Kazakhstan. La raison en est que, pendant toute la période des essais, de 1949 à 1989, seuls les experts militaires ont été autorisés à effectuer des mesures de rayonnement de portée limitée, telles que les mesures de dose d'irradiation au sol. De 1957 à 1960, l'Académie Nationale des Sciences du Kazakhstan et le Ministère de la Santé du Kazakhstan ont affecté une équipe de chercheurs à la région de Semipalatinsk avec mission d'étudier les conséquences des essais nucléaires pour la santé. Il n'a été fait usage d'aucune méthode épidémiologique pour les études comparatives Bien qu'il

ait été constaté que les villages périphériques présentaient, par rapport aux villages-témoins, une prévalence supérieure de symptômes tels qu'hémorragies branchiales, hémorragies des conjonctives de la bouche et des parties génitales, dystrophie des muqueuses, asthénie généralisée et syndrome du côlon irritable, altération de l'état sanguin périphérique, cataracte juvénile etc., tout rapport de ces symptômes avec la radioactivité fut rejeté lors d'une réunion de synthèse sur les résultats obtenus par les équipes de recherche, qui eut lieu à Moscou en 1961. Depuis lors, les institutions du Kazakhstan ne furent autorisées à effectuer aucun travail de recherche jusqu'à l'indépendance de la République ».

Le même ouvrage, tire les conclusions suivantes dans son chapitre sur les effets sur la santé des essais nucléaires :

“Un décompte provisoire des doses collectives reçues par les populations fortement affectées par les retombées locales des tirs atmosphériques indique un chiffre de 40 000 homme.Sv pour environ 100 000 personnes. En utilisant les coefficients de risque UNSCEAR (UNSCEAR, 1994) pour les expositions à forte dose/fort débit de dose, on peut estimer à environ 4000 la surmortalité due au rayonnement résultant de ces expositions. Sur la base de données provisoires provenant de l'ancienne URSS, la plupart des cas se seraient produits à la suite d'expositions au voisinage de Semipalatinsk. Ces extrapolations laissent prévoir un degré considérable de morbidité excédentaire et de surmortalité pour les décennies à venir. Il est nécessaire de consacrer de nouveaux efforts, particulièrement dans les zones de l'ancienne URSS jusqu'à présent mal étudiées, à l'évaluation sérieuse des expositions et des conséquences pour la santé, et à la mise en place d'un système de soins et d'indemnisation au bénéfice des victimes des essais ».

5.2. Les recherches récentes

Parmi les quelques recherches récentes qui ont pu être réalisées ou engagées depuis 1990, celles de l'Institut de recherche scientifique pour la médecine nucléaire et l'écologie du Kazakhstan a donné lieu à une communication d'étape du symposium d'Hiroshima en 1996 (B. Gusseïv, R. Rosenson et Zh. Aylkassumova).

Portant sur l'incidence des cancers dans les districts autour du site d'essais de Semipalatinsk, cette étude épidémiologique se fonde sur la prémisse que la principale contribution à la dose efficace cumulée (70 %) provient des essais de 1949 à 1956. La dose équivalente efficace calculée pour le groupe exposé s'étage de 870 mSv à 4470 mSv avec une moyenne de 2000 mSv ; la dose pour le groupe de contrôle (situé à 300 km du sud-est du site) est estimée à 70 mSv. Chaque groupe compte environ 10 000 personnes.

L'ouvrage précité (Nuclear Test Explosions - Scope 59, page 201-204) en donne la présentation suivante :

« L'évolution temporelle de l'incidence de cancers dans le groupe principal et dans le groupe témoin a été étudiée de 1956 à 1994 avec des intervalles de 5 ans. Le groupe d'âge de 40 ans et plus, d'une importance critique pour les études de cancer, était complété chaque année par des individus âgés de 20 à 39 ans, et commence progressivement à être complété par des individus du groupe initial de 0 à 19 ans. Compte tenu du fait que le groupe d'âge 0-19 ans se composait en 1990-1994 d'individus nés après 1971, il est certain que certains individus appartenant au groupe principal n'ont pas reçu une dose de rayonnement assez importante pour permettre de tirer des conclusions statistiquement significatives, malgré la variation aléatoire des effectifs. L'importance des échantillons de population fluctuait en fonction des taux de décès et de naissance ainsi que des migrations naturelles. Alors que les individus arrivant d'autres régions étaient exclus du groupe principal, les arrivants en provenance d'autres zones étaient intégrés dans les statistiques du groupe témoin. Il est essentiel de tenir compte, dans le groupe principal, du nombre d'habitants du village de Dolon, qui est tombé de 1300 en 1960 à 100 ou 150 en 1985. Ce groupe a été complété par des personnes venues d'un autre village situé à 125 km. de Dolon, mais a reçu une dose d'au moins 3 Sv à la suite du premier tir effectué le 29 Août 1949.

Au stade initial de 1956, les indices officiels d'incidence du cancer dans le groupe principal et le groupe témoin étaient respectivement de 61.7 et 63.6 cas pour 100 000 habitants, ce qui indique une sous-déclaration considérable des décès par suite de cancer. A partir des années 1960 à 1970, l'incidence du cancer dans les deux groupes augmentait régulièrement. Dans le groupe principal, après que niveau initial eut été multiplié par 1.5 en 1960 (passant de 7 à 11; voir tableau ci-après) on constatait un quadruplement rapide dans les années précédant 1965, pour atteindre un maximum de 36 dès avant 1970. Dans le groupe témoin, le taux d'incidence demeurait pratiquement constant, sans différer statistiquement de celui du groupe principal. A partir de 1975, l'incidence oncologique dans le groupe principal recommençait à augmenter pour atteindre en 1990 un deuxième maximum de 354 cas pour 100 000 habitants. Le risque relatif par rapport au groupe témoin était de 2.35 ($p = 0.005$). A partir de 1990, l'incidence oncologique dans le groupe principal plongeait à nouveau pour atteindre 215 cas pour 100 000 habitants. Dans le groupe témoin, le niveau d'incidence du cancer pour la même période ne montrait pas de changement significatif. La structure de l'incidence oncologique était dominée par les tumeurs localisées dans le tractus gastro-intestinal; dans cette structure, les carcinomes de l'œsophage constituaient l'affection principale, bien qu'on ait enregistré une importante modification de la structure de morbidité oncologique au cours de la période d'étude. D'après les statistiques nationales du Kazakhstan, le cancer de l'œsophage dans la population de la région de Semipalatinsk est une pathologie locale dont le niveau spontané est trois à quatre fois supérieur à la moyenne nationale. Lorsqu'arriva 1970 (14 ans après 1956), il avait atteint un maximum de 186 cas par 100 000 habitants. Parmi les membres du groupe témoin, l'incidence du cancer de l'œsophage avait progressé moins vite. Depuis 1975, on a observé une décroissance régulière de l'incidence du cancer de l'œsophage dans le groupe principal, avec un taux statistiquement égal à celui du groupe témoin ».

Incidence des tumeurs cancéreuses (1956-1994)

Groupes		Année									Total
		1956	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1994	
Population	Principal		9900	9650	9125	9620	9510	9630	9320	10 250	
	De contrôle		10 125	10 000	11 325	11 265	10 950	11 130	11 270	10 950	
All sites	Principal	7	11	29	36	20	27	28	33	22	213
	De contrôle	6	10	14	16	17	16	17	17	17	130
Oesophagus	Principale	5	7	16	17	10	12	11	10	7	-95
	De contrôle	4	6	6	9	9	7	6	7	6	60
Stomach	Principal	2	1	5	7	3	4	4	6	3	35
	De contrôle	2	1	4	4	2	3	3	3	4	26
Lung	Principale		1	2	3	1	3	2	4	2	18
	De contrôle		1	1	1	1	1	2	2	1	10
Leukemia	Principal		2	4	4	2	5	3	3	2	25
	De contrôle		2	2	2	1	3	0	2	1	13
Others	Principal		0	2	5	4	3	8	10	8	40
	De contrôle		0	1	0	4	2	6	3	5	21

Incidence de tumeurs cancéreuses et risques relatifs

Groupes		Année								
		1956	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1994
Tous les sièges	Principal	62	111	301	395	208	284	291	354	215
	De contrôle	65	99	140	141	151	146	153	151	155
	Risque relatif	0.97	1.13	2.15	2.79	1.38	1.94	1.90	2.35	1.38
Oesophage	Principal	44	71	166	186	104	126	114	107	68
	De contrôle	42	59	60	79	80	64	54	62	55
	Risque relatif	1.04	1.19	2.76	2.34	1.30	1.97	2.12	1.73	1.25

6. La situation radiologique actuelle du site d'essais

Certaines études effectuées depuis une dizaine d'années permettent de cerner les éléments d'appréciation de la situation radiologique et sont citées en référence de l'étude de l'AIEA qui a elle-même procédé à des analyses sur le terrain dans le cadre de ce qui est « *une évaluation préliminaire et des recommandations pour une autre étude* ».

6.1. Les études réalisées en 1990-1994

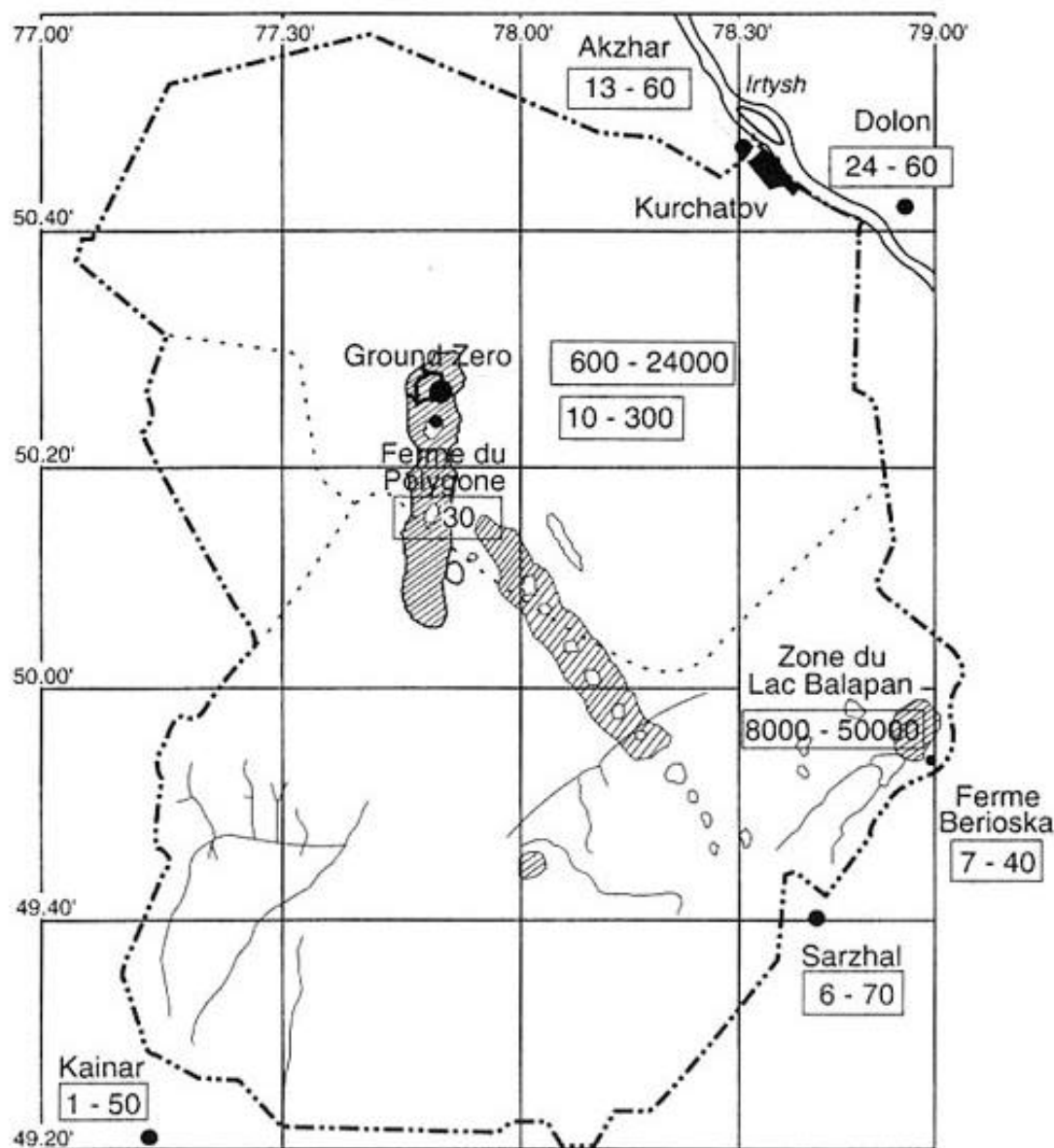
➤ Les relevés aérogammamétrie réalisés en 1990-1991 (Dr. Sonagoulov, Pr. Seisebaïev, cités par C. Chenal, Accidents et catastrophes nucléaires dans l'ex URSS, 2001) fait état de plusieurs zones contaminées **dans le polygone** :

- une zone centrale comportant principalement deux bandes de terrain de 100 km et 80 km de long, et respectivement de 6 à 8 et 4 à 5 km de large, déterminées par une isoligne de $18\,500\text{ Bq/m}^2$ ($0,5\text{ Ci/km}^2$) avec des contaminations maximales de $74\,000\text{ Bq/m}^2$ (2 Ci/km^2) et $185\,000\text{ Bq/m}^2$ (5 Ci/km^2) ;
- la zone du lac Chagan de 56 km^2 à la périphérie immédiate du lac, le niveau de contamination peut atteindre $1,85\,10^6\text{ Bq/m}^2$ (50 Ci/km^2) ;
- la zone des Monts Degelen, au sud du polygone : la radioactivité moyenne des sols y est de $14\,800\text{ Bq/km}^2$ ($0,4\text{ Ci/km}^2$) sur 12 km^2 et $74\,000\text{ Bq/m}^2$ (2 Ci/km^2) sur 24 km^2 .

➤ Les travaux précités (Dubasov et al. 1994) donnent en outre une mesure de la situation **en bordure du site d'expérimentation** indiquant qu'avec une hypothèse de répartition de la radioactivité uniforme, la contamination ne peut excéder $18\,500\text{ Bq/m}^2$ ($0,5\text{ Ci/km}^2$) de ^{137}Cs , $11\,000\text{ Bq/m}^2$ ($0,3\text{ Ci/km}^2$) de ^{90}Sr , $3\,000\text{ Bq/m}^2$ ($0,08\text{ Ci/km}^2$) de ^{239}Pu .

Les valeurs relatives au ^{90}Sr ne coïncident pas avec les relevés faits par la mission de l'AIEA en juillet 1994 ; elles coïncident en revanche pour le plutonium à Dolon où ont été mesurés des niveaux de 30 à 250 Bq/kg soit 100 fois le niveau des retombées mondiales.

Les campagnes de mesures effectuées en 1993-94 par l'AIEA ont permis de préciser la contamination des sols par places. Ainsi la carte ci-après pour le césium illustre-t-elle la situation des différents points :



Activités de ^{137}Cs (Bq.kg^{-1}) dans les sols prélevés sur le polygone de Semipalatinsk

Concernant les débits de dose, l'ouvrage précité de D. Robeau et C. Chenal indique : « Les débits de dose au niveau des taches les plus contaminées varient entre 10 et 7 μSv par heure, soit 100 à 500 fois le débit de dose par exposition externe dû à la radioactivité naturelle. Les débits de dose sont très variables en dehors de ces taches, ils peuvent représenter jusqu'à 20 fois le débit de dose par exposition externe dû à la radioactivité naturelle. Les données de l'AIEA sont peu nombreuses concernant les mesures sur le polygone ».

➤ Les prélèvements biologiques réalisés par les experts lors de la deuxième mission de l'AIEA en 1994 « ont confirmé la puissance du césium et du strontium mais à des niveaux cependant faibles : en moyenne 13 Bq.Kg^{-1} pour le premier et 61 Bq.Kg^{-1} pour le second » (D. Robeau et C. Chenal ibidem).

La même source indique, concernant la contamination des eaux : « Des études mécaniques ont montré que les perturbations hydrogéologiques dues aux essais souterrains (fissures et microfissures) n'ont pas touché le milieu au-delà de 500 m du point de tir.

Les mesures faites sur les eaux de surface et les eaux de puits dans le bassin versant des Monts Dégelen à l'Irtysh n'ont pas montré de contamination significative. Elles sont en général inférieures à $0,5 \text{ Bq.l}^{-1}$ et ne dépassent pas 2 Bq.l^{-1} . Cette contamination est attribuée à la lixiviation des sols par les eaux de pluie ou de fonte des neiges. La contamination de cette eau ne pose pas de problème sanitaire pour les populations.

Il est par contre certain que des activités résiduelles importantes sont présentes dans les poches créées par les explosions souterraines. Il est admis que l'activité présente est fixée dans les roches vitrifiées par la chaleur de l'explosion et par conséquent considérée comme non transférable. On ne peut cependant pas exclure qu'à long terme, une part de cette activité soit transportée par les eaux souterraines présentes dans ces poches ».

6.2. Une appréciation d'ensemble

➤ La conclusion générale de l'ouvrage précité (D. Robeau et C. Chenal) à l'issue du chapitre consacré au polygone d'essai, et ce principalement sur la périphérie, est la suivante :

« De cette approche dosimétrique globale et encore incomplète des territoires contigus au polygone, on peut tirer les renseignements suivants :

- Le problème majeur semble lié aux conséquences à long terme des irradiations externes et internes liées aux explosions aériennes et plus particulièrement au sol, principalement dans les années 1949 et 1953.

- La contamination résiduelle actuelle semble très faible notamment en ce qui concerne le césium mais la contamination due au plutonium n'est pas précisée.

- Une partie importante de la population a été exposée dans les années 1950-1960. Les doses reçues par les habitants des villages situés à proximité du site d'essais nucléaires sont de l'ordre de 2 Gy et probablement supérieures à certains endroits. Cette exposition a touché des villes importantes situées de 150 à 500 km du site, principalement Semipalatinsk, Oust-Kamenogorsk et Pavlodar au Kazakhstan, Barnaul en Russie. Les conséquences de ces expositions ne sont pas connues.

• *Pour l'avenir, le problème principal est celui de la contamination qui résulterait de la mise en culture et de la reprise de l'élevage sur le polygone où l'on sait que la contamination résiduelle est en certains endroits très importante. Aucune mesure de protection des populations de ce site n'a été prise jusqu'à présent, afin d'éviter les effets d'une contamination de ces populations, via la chaîne alimentaire ».*

6.3. Le rapport de l'AIEA

Le gouvernement du Kazakhstan a saisi l'AIEA après le forum de mai 1993 tenu à Vienne sur le renforcement des structures de sécurité nucléaire et radiologique dans les états issus de l'ex-URSS.

Les missions sur le terrain se sont déroulées en novembre 1993 et juillet 1994. La publication officielle du rapport est datée de novembre 1998. Le document lui-même, d'une trentaine de pages, s'intitule : *« Conditions radiologiques du site d'essais de Semipalatinsk, Kazakhstan : évaluation préliminaire et recommandations pour une autre étude ».*

Les travaux sur lesquels cette évaluation s'appuie et ceux qui ont été directement réalisés dans le cadre du rapport ayant été indiqués ou évoqués précédemment en tant que de besoin, on se limitera ici essentiellement à citer les conclusions et recommandations après avoir rappelé quelques éléments résumés du préambule qui cadrent l'objet du rapport :

« Préambule :

Ce rapport présente les conclusions d'une étude des conditions radiologiques actuelles sur l'ancien site d'essais nucléaires de Semipalatinsk, au Kazakhstan, étude menée par une équipe d'experts internationaux sous les auspices de l'A.I.E.A. L'étude a été lancée en réponse à une demande du gouvernement du Kazakhstan qui sollicitait l'assistance technique de l'A.I.E.A. Les objectifs de cette étude consistaient à évaluer les doses de radiations actuelles et éventuellement futures imposées aux habitants de la zone du site d'essais nucléaires de Semipalatinsk et des établissements humains contigus, afin de conseiller une action corrective si celle-ci est appropriée et de recommander si une autre évaluation radiologique de la zone se justifie (...).

L'évaluation est par nature une estimation préliminaire. Elle ne constitue pas une enquête radiologique globale du site, lequel couvre une très grande superficie, mais détermine plutôt les sujets nécessitant une autre étude afin de pouvoir acquérir une compréhension totale de la situation radiologique sur le site. L'étude porte sur l'évaluation des conditions radiologiques actuelles pour les personnes vivant à l'intérieur du site d'essais et à proximité directe de celui-ci. Elle ne s'attache pas à l'évaluation des doses de radiations ayant pu être reçues dans le passé, suite aux essais

nucléaires, par les populations habitant dans la région ou aux effets de ces doses sur ces populations ».

Les observations générales qui précèdent les conclusions point par point sont ainsi précisées :

« Le site d'essais de Semipalatinsk couvre une très grande superficie de terres sur laquelle ont été menées diverses activités associées aux explosions nucléaires et en complément de celles-ci. Dans ce rapport, l'attention est portée sur des lieux qui, en raison de leur population ou de leurs niveaux d'activité résiduelle, pourraient être importants en termes d'irradiation actuelle des personnes y vivant. Une évaluation radiologique détaillée de l'ensemble du site d'essais et de toutes les activités impliquant des radiations nécessiterait des ressources très importantes et dépassant celles dont dispose l'A.I.E.A. »

Les conclusions point par point relatives à la situation sur le site lui-même sont les suivantes :

« 1 On estime qu'il existe un nombre suffisant de preuves pour indiquer que la plus grande partie de la zone présente peu ou pas de radioactivité résiduelle suite aux essais nucléaires. Les secteurs du Point Zéro et du Lac Balapan qui sont tous les deux fortement contaminés sont des exceptions évidentes.

2. Les mesures effectuées au Point Zéro sont suffisantes pour déterminer la structure de la contamination. Elles révèlent en particulier que la contamination est relativement localisée. Une étude similaire est recommandée afin de définir la répartition de la radioactivité résiduelle autour du Lac Balapan.

3. Il est assez évident que les niveaux de contamination peuvent également être importants sur les autres sites d'excavations nucléaires plus petits, tels que ceux de Telkem et de Sary-Uzan. Toutefois, les données disponibles sont insuffisantes pour en tirer des conclusions sûres. De plus amples détails concernant les essais entrepris sont nécessaires pour identifier d'autres zones potentiellement affectées. Des programmes de surveillance radiologique pourraient ensuite être mis en place, selon les besoins.

4. Les missions n'ont pas pu corroborer l'existence de résidus d'actinides provenant des essais nucléaires manqués. Une description de la nature des essais manqués, des conditions à l'époque ainsi que des données à l'appui sont nécessaires avant de pouvoir envisager d'autres recherches.

5. Il n'existe aucune restriction d'accès au site d'essais de Semipalatinsk et une réoccupation limitée du site a déjà commencé. Une évaluation de l'irradiation des personnes se rendant quotidiennement au Point Zéro ou au Lac Balapan a été entreprise. Celle-ci indique des irradiations annuelles dans la région de 10 mSv, principalement dues à une irradiation externe.

6. Il ne se trouve jusqu'à présent aucun établissement humain dans les secteurs du Point Zéro ou du Lac Balapan. Si, à l'avenir, ces secteurs venaient à être habités en permanence, les irradiations annuelles prévisibles seraient de l'ordre de 140 mSv/a. L'exposition externe est la principale voie d'exposition (65% de la dose totale), suivie de l'ingestion de nourriture produite localement (31%) et de l'inhalation de radionucléides remis en suspension (4%).

7. La dose annuelle estimée pour des conditions d'occupation permanente au Point Zéro et au Lac Balapan est supérieure au niveau auquel il est jugé qu'une intervention doit de toute façon avoir lieu. Une action corrective pour les zones situées immédiatement autour du Point Zéro et du Lac Balapan est par conséquent considérée comme nécessaire. Cette action est recommandée afin d'éviter l'exposition des futurs habitants de ces zones. Elle doit aussi assurer que l'exposition courante aux rayonnements des personnes vivant dans le site d'essais nucléaires ou se rendant régulièrement dans ces zones est réduite.

8. Il est conseillé que l'action corrective la plus appropriée en ce moment consiste à restreindre l'accès dans les zones du Point Zéro et du Lac Balapan ».

Les conclusions sur la situation à l'extérieur du site sont ainsi résumées dans le rapport lui-même :

« Les mesures effectuées autour du site d'essais pendant les missions de l'A.I.E.A. étaient relativement compatibles avec les études menées dans cette zone par des organisations du Kazakhstan et de l'ex-Union soviétique. L'on considère donc que les données disponibles sont suffisantes pour faire une évaluation préliminaire des conditions radiologiques à l'extérieur du site d'essais de Semipalatinsk. Une exception toutefois concerne l'approvisionnement en eau potable. Les missions de l'A.I.E.A. n'ayant pas analysé l'ensemble de l'approvisionnement en eau potable et n'ayant pas pu estimer la sécurité future de l'approvisionnement, une étude hydrologique est conseillée afin d'examiner s'il est possible à l'avenir que des radionucléides provenant des essais souterrains apparaissent dans les sources d'eau potable locales. En fonction des résultats de cette étude, un programme de surveillance de l'eau potable peut être opportun.

Dans la plupart des zones, les niveaux de doses d'exposition externe et l'activité du sol sont les mêmes ou approximativement les mêmes que les niveaux de base d'autres régions ou pays où aucun essai d'armes nucléaires n'a eu lieu. La dose annuelle réelle estimée reçue par des personnes se trouvant à l'extérieur du site d'essais nucléaires et provenant de la radioactivité résiduelle est au maximum de 0,1 mSv (ce qui donne une dose réelle totale de 2,5 mSv/a lorsque l'exposition à des sources naturelles de radioactivité est incluse). Les irradiations réelles sont vraisemblablement plutôt de l'ordre de quelques microsieverts par an, niveau de dose très proche de la moyenne globale suite aux retombées radioactives. Sur la base de ces témoignages, l'on considère qu'une intervention visant à réduire l'exposition aux

radiations des personnes se trouvant à l'extérieur du site d'essais de Semipalatinsk n'est pas justifiée. »

Ces remarques s'appliquent à la zone extérieure et contiguë au site où l'AIEA a effectué ses relevés et travaux. Elles ne s'appliquent pas aux zones plus lointaines dont on a vu qu'elles ont subi des retombées significatives à l'époque des essais (villes d'Ust-Kamenogorsk, de Semipalatinsk, de Pavlodar et région de l'Altai).

III - Les tirs d'activités pacifiques

Le nombre indiqué par M. Donald J. Bradley (op. cit. page 504) pour ces tirs d'activités pacifiques s'élève à 156, confirmé par d'autres sources, répartis selon le même auteur en :

- 124 explosions (avec 135 charges) dites « industrielles souterraines ou d'essais de technologies de tirs à usage pacifiques »,
- 32 explosions (avec 38 charges) dites « d'essais de charges nucléaires industrielles pour des usages pacifiques », ce qui peut laisser également supposer qu'elles n'étaient pas nécessairement souterraines.

La distinction délicate entre ces deux catégories au sein de l'ensemble des tirs d'activités pacifiques ainsi que des problèmes de traduction semblent être à l'origine des décomptes différents que l'on rencontre suivant les auteurs.

La localisation de ces explosions est extrêmement diversifiée sur l'ensemble du territoire soviétique, la Sibérie orientale en étant toutefois presque totalement exemptée, de même que le Caucase, les pays baltes, le Tadjikistan et le Turkménistan : la carte de l'ensemble des tirs (cf. page 157) le montre clairement. On compte approximativement la totalité de ces tirs pour chacune des Républiques ayant composé l'URSS :

- 114 en Russie (ex-RSFSR)
- 36 au Kazakhstan
- 3 en Ouzbékistan
- 2 en Ukraine
- 1 au Turkménistan

Aucune information n'a été publiée concernant les quantités spécifiques de radioactivité dégagées dans les réseaux d'eaux de surface dues à ces différents types d'explosion ; la plupart des essais furent souterrains, de puissance très variable (de

moins de 0,1 kt à 100 kt). Selon le ou les objectifs du ou des tirs, la profondeur des tirs est très variable : de quelques mètres jusqu'à plus de mille mètres.

Les cinq tirs d'excavation (ou de cratère) pratiqués à Semipalatinsk (cf. supra) sont compris dans le décompte ci-dessus.

➤ Selon M. Donald J. Bradley (page 512), citant M. Bulatov (1993) les objectifs de ces tirs étaient les suivants :

« • expériences de formation de cratères et de déplacement de terre (comme pour le canal des rivières Pechora-Kam et le village d'Udachnyy à Yakutia-Sakha, et la vallée de la rivière Chagan dans l'oblast de Semipalatinsk),

• formation de cavités dans les mines de sel pour stocker du pétrole et, si possible, des déchets radioactifs liquides,

• augmentation de l'émission de gaz et contrôle de l'écoulement de pétrole brut (comme à Ust-Balyk dans l'oblast de Tyumen, au gisement de Grachevskiy à Bashkortostan),

• tirs souterrains sous contrat du Ministère de la géologie aux fins d'essais sismiques de la croûte et du manteau terrestres (39 explosions),

• remise en état après des accidents et des feux survenus dans des puits de pétrole jaillissants (quatre explosions),

• destruction d'armes nucléaires tactiques de faible puissance en les allumant sur des territoires isolés, y compris ceux affectés à ce que l'on appelle les «entreprises forestières commerciales militaires »,

• développement du processus de destruction des armes chimiques en utilisant des engins nucléaires. »

Les éléments suivants, présentés par le même auteur citant lui-même entre autres des sources russes, permettent de mieux saisir la diversité et l'importance de ces tirs, ainsi qu'une partie de leurs conséquences :

« • Oblast de Murmansk - Trois explosions nucléaires pacifiques furent mises en œuvre sur la péninsule de Kola près de Kirovsk afin d'augmenter la production de minerai d'apatite utilisé pour produire des phosphates. De grandes crevasses et des amoncellements de graviers peuvent encore être observés aujourd'hui à l'extérieur de la mine. Des niveaux élevés de certains isotopes ont été mesurés dans une rivière, située juste en dessous de la mine, qui s'écoule dans le Lac Imandra.

• Oblast d'Arkhangelsk (à l'exclusion du site d'essais de Nouvelle-Zemble) - Plusieurs explosions nucléaires pacifiques furent effectuées, certaines en lien avec des essais sismiques de la croûte terrestre. Une explosion nucléaire pacifique fut

déclenchée dans la région autonome des Nenets dans la partie nord de la région d'Arkhangelsk, pour éteindre un feu d'éruption d'un puits de gaz au champ de Kumzhinsokoye, ayant brûlé pendant plusieurs années (Nilsen et Bohmer 1994) ; il ne le fut malheureusement pas, tenu compte de la faible densité du sol tourbeux, et l'explosion se produisit au-dessus du sol au lieu d'être souterraine comme prévu. En conséquence, l'estuaire de la rivière et une immense superficie de terrain sec furent contaminés. Au lieu d'avoir un seul puits en feu, six nouveaux foyers furent allumés et il ne fut pas possible de les éteindre rapidement. (Uryadovyy Kuryer, 17 juillet 1992).

En 1971, 1,3 Ci de ^{137}Cs au total se dégagèrent de l'explosion souterraine Globus-1 de 2,3 kilotonnes, contaminant $2\,600\text{ km}^3$. Le même type de dégagement se produisit lors de l'explosion de Globus-2 dans l'oblast d'Arkhangelsk (Rapport d'Etat russe 1994).

• Oblast de Perm - En 1969, deux explosions nucléaires souterraines, d'une puissance de 7,6 kilotonnes chacune, furent dans le gisement pétrolier d'Osinskiy (oblast de Perm) pour stimuler la production pétrolière. Cette tentative fut appelée le projet Grifon. Une contamination au tritium a été détectée dans l'eau et les produits dérivés du pétrole à une distance de 10 km de diamètre autour des puits (Rapport d'état russe 1994). Les essais effectués sur le gisement pétrolier d'Osinskiy en septembre 1969 augmentèrent la production pétrolière de 0,5 million de tonnes, entraînant un bénéfice de 4 millions de roubles, cependant quelques années plus tard, de l'eau radioactive commença à s'écouler des puits épuisés. Une irradiation gamma élevée et $^{137}\text{Cs} + ^{90}\text{Sr}$ furent détectés sur ces sites, et de petites rivières proches des gisements contiennent des sédiments contaminés. La terre contaminée a été enfouie, la construction d'un site d'enfouissement spécifique étant planifiée pour les vannes et la robinetterie (Bulatov 1993).

En plus des essais effectués au champ de pétrole d'Osinskiy à une profondeur de 1 200 m, des essais furent aussi réalisés au champ de pétrole de Gaeja (deux en 1984, deux en 1987) à une profondeur de 2 000 m (Oborin et Mikchailov, octobre 1996 ; Minatom et MOD 1996). Apparemment, des dégagements en surface se produisirent, dus à des forages ultérieurs dans les champs de pétrole ainsi qu'à la contamination d'eau souterraine provenant de puits d'injection d'eau de décharge défectueux (Bulatov 1993). Actuellement, on observe des niveaux d'activité de rayonnements gamma en surface de 60 à 300 ($\mu\text{R/hr}$). Des efforts sont faits actuellement pour développer des microorganismes afin de nettoyer des zones en surface contaminées par des émulsions de pétrole / d'eau (Oborin et Mikchailov, octobre 1996).

Trois explosions nucléaires furent réalisées le 23 mars 1971, dans le rayon (secteur) de Cherdyn près de la réserve naturelle de Pechora-Ilych. Les explosifs furent mis à feu dans des puits spéciaux légèrement à l'écart à une profondeur de 130 m environ (Bulatov 1993), à 20 km de la ville de Krasnovichersk, à 300 km au nord-est de Perm (Nucleonics Week, 9 mai 1991). L'objectif des trois explosions de 15 kilotonnes était de créer la fondation du canal de dérivation de Pechora-Kama. A la place, un lac fut formé et le cratère révèle une irradiation s'élevant jusqu'à $2\,500\text{ }\mu\text{R/hr}$ (Bulatov 1993).

Le lac mesure 400 m de large et 600 m de long et est signalé comme présentant des doses de 1,5 rem/hr mesurées en surface et de 5 rem/hr à une profondeur de 12 m (Nucleonics Week, 9 mai 1991). Les dimensions de la formation de retombées radioactives étaient de 7 km de long et de 1,5 km de large (Bulatov 1993).

- *Bashkortostan* - En 1965, un essai nucléaire souterrain fut effectué sur le gisement pétrolier de *Bashkortostan* (Bulatov 1993). Un explosif nucléaire aurait été également utilisé pour stopper un feu incontrôlé dans un puits de gaz près de *Boukhara* (Nucleonics Week, 9 mai 1991).

- *Oblast d'Astrakhan* - Nombreuses explosions de faible puissance dans des dépôts salins en forme de dômes.

- *Oblast de Tyumen* - Des explosions nucléaires souterraines furent réalisées dans cet oblast, dont cinq sur le gisement pétrolier de *Sredne-Balykskiy*. L'une d'elles, dans le bassin de *Yugana*, s'est accompagnée de la libération de radionucléides en surface et provoqua une contamination à grande échelle du territoire.

- *Région de Krasnoyarsk* - Dix explosions souterraines environ y furent effectuées ; deux d'entre elles près du lac *Lama* (qui alimente en eau la ville de *Norilsk* et ses villes satellites de *Taliakh* et *Kayyerkan*), et deux à une distance de 30 à 40 km de *Tura*, capitale de l'*Evenk*. L'explosion près du village de *Yermakovo* (près de la rivière *Igarka*) s'est accompagnée de la libération de matières radioactives. Une autre explosion a été signalée à l'embouchure de la rivière *Kataramba*.

- *Yakutia-Sakha* - Une explosion directionnelle souterraine fut effectuée en 1975, à 5-6 km au nord-est de la ville d'*Udachnyy* et sous l'autorité des chantiers locaux de traitement des minerais afin de former un remblai qui remplacerait un barrage volumineux (on estimait que 3 000 à 5 000 mégatonnes de TNT seraient économisées). Le résultat fut la formation d'une dépression qu'il a fallu combler. Après une explosion dans la même région (50 km d'*Aykhal*) en 1978 (l'explosion *Kristall* à une profondeur de 100 m), le nuage de rejets aurait parcouru des milliers de kilomètres. A *Tayga*, l'irradiation dans la forêt morte dépasse 750 $\mu\text{R/hr}$ et un site d'enfouissement nucléaire doit y être maintenu. Une explosion près de *Tas-Yuryakh* créa un site de stockage de pétrole souterrain de 10 000 m³. Le territoire du bassin *Vilyuy* de *Yakutiae* a été officiellement désigné comme zone de désastre écologique. Parmi les causes, une série d'essais nucléaires souterrains est retenue.

Plusieurs explosions ont eu lieu dans cette région à des fins d'exploration sismique profonde de la croûte terrestre (Bulatov 1993) :

- *Gorizont-4* : août 1975, 130 km au sud-ouest du village de *Tiksi* avec une profondeur d'explosion de 500 m.

- *Kraton 3* : août 1978, 50 km au sud d'*Aykhal*, à une profondeur de 600 m, entre les rivières *Lena* et *Illioui* (Bulatov 1993 ; Nucleonics Week, 7 novembre 1991)

explosion accompagnée de la libération accidentelle de produits de fission dans l'atmosphère et de la formation d'une zone de contamination de 0,450 km². Les plus forts niveaux de taux de dose d'irradiation au rayonnement gamma s'élevèrent à 214 µR/hr en 1993 (Rapport d'état russe 1994).

- Kimberlit-4 : août 1979, 170 km au nord-est d'Olekminsk avec une profondeur d'explosion de 1 000 m.

• Trans-Baykal - La population locale fut relogée à la suite du tir de Rift-3 (explosions à une profondeur de 860 m et d'une puissance déclarée de 10 kilotonnes environ) près du village de Barakhan, à 50 km au nord-est du centre du rayon (secteur) d'Osa.

• Kazakhstan - (...) Dans l'oblast de Guryev, on procéda à 25 explosions nucléaires souterraines de faible puissance (5 - 15 kilotonnes) dans les strates de sel de 1980 à 1984, et à 16 essais entre 1968 et 1974 dans le secteur d'Azgir. La contamination sur les lieux des essais nucléaires souterrains dans le rayon (secteur) de Baygaminsky, région de Mangyshlak (trois essais à une profondeur de 400 à 740 m laissèrent d'énormes cratères), et dans l'oblast de Chimkent (rayons de Suzakskiy et de Kyzylkum) est en cours d'étude. Dans l'oblast de Chimkent, des concentrations anormales de ⁹⁰Sr et de ¹³⁷Cs furent détectées dans 39 puits souterrains, fournissant la preuve de la contamination des eaux souterraines (Bulatov 1993). Suite aux essais réalisés dans les gisements de sel d'Azgir, neuf cavités durables de 1,2 millions de m³ furent formées, et un essai entraîna la formation d'un cratère effondré de 500 m de diamètre et allant jusqu'à 18 m de profondeur. Quelques gaz radioactifs se dégagèrent pendant ces essais. Actuellement, cinq des cavités sont remplies d'eau salée provenant d'une zone aquifère voisine, et la cavité répondant le mieux aux exigences requises pour la formation d'installations de stockage est actuellement utilisée pour stocker la terre contaminée provenant des opérations menées sur le site de Bolshoi Azgir. Le tableau ci-après fournit des détails sur les essais effectués et la radioactivité dégagée à Bolshoi Azgir (Krivokhatskiy et coll. 1993).

Date	Profondeur (m)	Puissance d'explosion de l'essai (en kt)	Durée des rejets après l'essai	Rejets (en Ci)
22 Avril 1966	160	- 1,1	- 12 minutes	190 000
1 ^{er} Juillet 1968	600	- 25	- 30 minutes	5 400 000
22 décembre 1971	1 000	< 70	--	--
29 juillet 1976	1 000	< 60	1 an	500
30 septembre 1977	1 500	< 10	- 4 heures	120 000
17 octobre 1978	1 000	< 60	4,25 ans	200
18 décembre 1978	900	- 100	--	--
17 janvier 1979	1 000	< 60	- 60 minutes	4 000 000
14 juillet 1979	1 000	< 15	4,25 ans	40
24 octobre 1979	1 000	< 30	3,4 ans	5

➤ D'autres applications des explosions nucléaires ont été réalisées ou envisagées. Ainsi, pour décharger des déchets industriels toxiques dans la cavité ou les « crevasses allongées », jusqu'à 200 mètres à partir de la cheminée, créées par l'explosion d'un dispositif de 10 à 20 kt. Selon M. Donald J. Bradley (op. cit. page 517) : *« Ce concept a déjà été démontré par deux explosions réalisées à titre d'essai –il y a plus de 15 ans – (l'une d'elle de toute évidence dans des strates remplies d'eau hautement minéralisée). Plus de 20 millions de m³ de déchets liquides comprenant 1000 tonnes de « résidus » solides furent refoulés dans l'une de ces cavités sur une période de 13 ans. Plus de 150 000 m³ de déchets toxiques qui comprenaient une grande quantité de particules en suspension et de « substances résineuses » furent refoulés dans l'autre cavité sur une période de cinq ans ».*

Le même auteur indique qu'une société « International Cletek Corporation », qui aurait été créée en décembre 1990, a tenté à l'époque « de mettre sur le marché des dispositifs thermonucléaires de tirs souterrains pour la destruction de déchets chimiques et industriels ». Malgré la fermeture du site d'essais de Semipalatinsk par M. Michael Gorbatchev et M. Nursultan Nazerbaïev, puis celui de Nouvelle Zemble par M. Boris Eltsine (1991), ce projet semble avoir été poussé pendant quelques années encore, notamment pour l'élimination de combustibles de réacteurs endommagés de sous-marins nucléaires qui ne sont plus susceptibles d'être retraités (ibidem).

IV - Le site d'essais de Nouvelle-Zemble

1. Présentation générale

Sur le site d'essais du Nord, appellation en usage à l'époque des essais, les éléments d'informations sont plus difficiles à réunir que sur le site de Semipalatinsk où, depuis 1990, des spécialistes de divers horizons ont pu, certes tardivement, effectuer des recherches. En fait, à l'exception de ce qui pouvait être observé de l'extérieur, on a commencé à recueillir des indications tangibles qu'à partir de 1992-1995. Les décomptes des tirs souterrains ne coïncident pas toujours selon les auteurs, de même que la localisation.

Au total, selon M. Donald J. Bradley (op. cit. page 503), 130 essais nucléaires ont eu lieu en Nouvelle-Zemble dont 91 atmosphériques. En l'absence d'information, on peut néanmoins supposer qu'après les effets considérables des tirs de 1953 à Semipalatinsk et notamment celui de la première bombe thermonucléaire le 12 août (400 kt), l'installation d'un site où l'on pourrait effectuer des tirs d'une puissance sans rapport avec ce qui avait eu lieu jusque là devenait urgent. Le site de Nouvelle-Zemble où l'on pouvait en outre pratiquer des tirs sous-marins, entra en

service en septembre 1955 ; le premier tir aérien en septembre 1957 et le dernier le 25 décembre 1962 et le dernier souterrain le 24 octobre 1990.

Le site du Nord comprenait en fait deux pas de tirs distants de près de 200 km d'une part la baie de Chernaya au sud de l'île où ont eu lieu un petit nombre d'essais sous-marins notamment entre 1955 et 1957 et entre 1973 et 1975. Tous les autres essais atmosphériques ont été réalisés dans le détroit de Matotchkin qui sépare les deux îles constituant la Nouvelle-Zemble. Des essais souterrains semblent s'être déroulés majoritairement sur la partie nord du site d'essais de Nouvelle-Zemble (28 tirs au moins), le reste sur la partie sud jusqu'en 1975.

1.1. Les essais atmosphériques

Les 91 essais atmosphériques de Nouvelle-Zemble représentent une puissance totale de 239,6 Mégatonnes, soit 97 % de la puissance des essais atmosphériques soviétiques et près de 55 % de la puissance dégagée par la totalité des essais atmosphériques mondiaux (440 Mt). La part d'énergie de fusion est de 158,8 Mt et celle de fission de 80,8 Mt. La répartition de la puissance de fusion a donné 77,8 Mt dans la stratosphère, 2,93 Mt dans la troposphère et 0,036 Mt en retombées locales et régionales.

Cette répartition s'explique logiquement par le type de tirs auxquels il a été procédé en Nouvelle-Zemble : à l'exception de six essais, tous les autres ont été réalisés « par air » (cf. UNSCEAR) sans autre précision mais semble-t-il à une altitude suffisante pour minimiser les retombées. Les tirs les plus considérables auraient été réalisés par avion, le plus puissant de tous à 50 Mégatonnes le 30 octobre 1961 avec une explosion à 3 500 mètres d'altitude. La puissance de ce dernier tir dépasse de 11 Mt la somme de la puissance total des essais atmosphériques chinois (20,72 Mt), français (10,2 Mt) et britanniques (8,05 Mt). D'après certains spécialistes, ce tir aurait en fait eu une puissance de 58 Mt. Cinq essais soviétiques en Nouvelle-Zemble ont dépassé le tir américain le plus puissant (15 Mt) qui se trouve avoir été le tir « Bravo » lequel s'est traduit par l'accident le plus grave pour les Etats-Unis. Ces cinq tirs ont eu lieu au cours de la période de la reprise des essais en 1961-62 et ont totalisé une puissance de 138,6 Mt.

Les six essais atmosphériques qui n'ont pas été effectués en altitude sont trois essais sous-marins réalisés par 30 mètres de fond dont au moins un sur des cibles constituées de vieux navires de guerre (cf. « Crossroads » à Bikini en 1946) en 1955, 1957 et 1961 ; pendant les mêmes périodes, deux essais à la surface de l'eau et un à la surface du sol ont eu lieu (52 kt en tout pour ces essais). Comme tous les essais de ce type, ces six tirs ont entraîné une substantielle contamination locale, ce qui ne paraît par avoir été le cas des essais d'altitude.

1.2. Les essais souterrains

Au-delà des indications déjà fournies (cf. supra) sur leur localisation, les informations dont on dispose donnent un éclairage sur la puissance de ces tirs. En ce qui concerne la zone d'essais sud du site de Nouvelle-Zemble, entre 1973 et 1975, outre des tirs de l'ordre de 50 à 70 kt, ont eu lieu les plus puissants des tirs souterrains : entre 3,5 et 4 Mégatonnes en octobre 1973 et deux autres de l'ordre du Mégatonne. Sur la partie nord du site, 28 tirs au moins ont été effectués. Selon M. Donald J. Bradley (op. cit. page 504), « *sur l'ensemble des essais souterrains, dont il évalue le nombre à 42, 15 ont été totalement confinés, 25 ont été accompagnés de relâchement de gaz inertes et 2 ont conduit à des situations de radiations anormales* » (selon un rapport de l'OTAN de 1995 qu'il cite).

2. Les incidences des essais

2.1. La mesure de la radioactivité

➤ L'ensemble des explosions

Les mesures données par l'ouvrage précité (M. Donald J. Bradley page 506) sont les suivantes pour le césium, le strontium et le tritium, émis par les essais sur le site de Nouvelle-Zemble, rapportées à l'ensemble des essais atmosphériques dans le monde :

Site	Rejets ^{137}Cs (PBq) (Ci)		Rejets ^{90}Sr (PBq) (Ci)		Rejets ^3H (PBq)	
Nouvelle –Zemble	410	(11,1 M Ci)	270	(7,3 M Ci)	150 000	(4 054 M Ci)
Monde entier	910	(24,6 M Ci)	600	(16,2 M Ci)	240 000	(6 486 M Ci)

(Le rapport de l'OTAN indique qu'en raison de la décroissance, l'activité mondiale de césium (^{137}Cs) restante est à peu près, en 1995, égale à 600 Pétabecquerels ou 16,2 MCi. Les calculs correspondants pour le strontium (^{90}Sr) et le tritium (^3H) donnant une radioactivité au niveau mondiale de 10,5 MCi et 23 330 MCi respectivement).

Les mesures par aérogammamétrie et analyses radiologiques montrent, d'après les mêmes sources, que pour l'ensemble du territoire des sites d'essais, le niveau de dose d'exposition aux rayons gamma est à peu près le même que le rayonnement naturel ; la contamination par les radionucléides d'origine artificielle n'est supérieure que marginalement au « bruit de fond » naturel. Une exception, sans autre

précision, à cette situation est fournie par les zones où les essais ont eu lieu au début de la mise en service du site, soit environ sur 10 km². La situation de l'une de ces trois zones s'explique par un tir souterrain non confiné d'août 1987 ; il en serait de même d'un autre de 1969. Une deuxième zone, plus importante semble avoir été contaminée par un tir en surface (septembre 1957) dont la trace s'est étendue sur 1500 km avec un niveau d'activité maximal relevé à 300 mr/heure en 1964 et qui à « l'épicentre » était encore de 200 mr/heure en 1990. L'ensemble des essais nucléaires souterrains auraient entraîné l'émission de 2 500 à 5 000 Ci de césium 137 à la surface du sol.

➤ Les essais nucléaires sous-marins (trois à 20 kt chacun selon l'IPSN) en 1955, 1957 et 1961, auraient dégagé environ 350 TBq de césium 137, 230 TBq de strontium 90, et 60 TBq de plutonium 239 ; l'activité des deux premiers radionucléides se serait abaissée en 1995, respectivement de 150 TBq de césium, 100 TBq de strontium.

Les côtes de la Nouvelle-Zemble connaissent par ailleurs une importante contamination radioactive avec notamment les immersions de déchets auxquelles il a été procédé de 1959 à 1993 sur un ensemble de 8 sites (carte Est) à de faibles profondeurs (de 12 à 120 mètres en moyenne) ; les éléments les plus contaminants étant constitués par des réacteurs de sous-marins ou d'autres navires, avec ou sans leur combustible, les fleuves sibériens (Ob, Irytch, Iéniéséï) en aval des sites où ont eu lieu des accidents nucléaires majeurs (Techa, Mayak, Tomsk) ayant entraîné des rejets importants, se jettent en mer de Kara à l'est de la Nouvelle-Zemble.

2.2. Les conséquences observées

Ainsi que le soulignent plusieurs auteurs, notamment Sir Frederick Warror et Rese JC. Kirchmann (Nuclear Test Explosions - Scope/59 op. cit. page 157), il y a très peu d'informations sur les doses locales et régionales résultant de ces essais et il est probable que les doses locales aux habitants en dehors du site soient relativement basses pour deux raisons :

- sauf les quelques exceptions signalées, tous les tirs ont eu lieu à des altitudes élevées, voire très élevées ;
- la Nouvelle-Zemble, dans la zone polaire, est isolée et était presque inhabitée. Archangelsk, la ville la plus importante dans la région, est distante de près de 1000 km.

Des quelques éléments d'informations disponibles aujourd'hui (car des études sont en cours), il apparaît que la conséquence la plus préoccupante est la contamination des lichens par césium 137 et le strontium 90 à la base de la chaîne alimentaire lichens-rennes-hommes. Les particularités du lichen (structure, absence de racines, etc...) montrent qu'avec une surface d'adsorption qui est de 2 à 100 fois plus importante que l'herbe, il concentre considérablement le césium. Pour les

30 000 personnes d'un groupe critique d'habitants répartis dans l'extrême nord et employées dans l'élevage des rennes et les activités connexes, les doses (internes) absorbées étaient voisines de 10 mSv. Un ensemble de 300 000 personnes réparties de Mourmansk jusqu'en Iakoutie est moins sérieusement concerné.

Le taux de cancers digestifs est très élevé dans ces régions mais le régime alimentaire pourrait en être la cause, indépendamment de la consommation de viande de renne ; par ailleurs on ne dispose pas d'éléments épidémiologiques spécifiques.

V - Les autres sites d'essais

L'ensemble des sites où il a été procédé à des tirs souterrains militaires ou pour un usage pacifique ont été précédemment traités. Seuls les essais militaires atmosphériques réalisés en dehors des sites de Semipalatinsk et de la Nouvelle-Zemble restent à évoquer :

1. Kapustin Yar

Onze essais militaires ont été effectués depuis Kapustin Yar qui est un pas de tir pour missiles situé dans la région d'Astrakhan. Dix de ces essais ont eu lieu du 19 janvier 1957 au 1^{er} novembre 1962. Les sept premiers tirs étaient effectués avec des bombes atomiques de puissance limitée (0,12 kt à 1 kt) sauf une (40 kt) ; les trois derniers étaient des tirs thermonucléaires (300 kt) qui, comme les deux derniers de la première série, ont été effectués dans la haute atmosphère. Aucun effet local ou régional de ces essais par missile n'était à attendre.

En revanche, pour le tir qui a eu lieu le 2 février 1956 par missile à Aralsk au Kazakhstan, une partie de la puissance de fusion a été dégagée au niveau local et régional. Cette bombe, de très faible puissance (0,03 kt) a en effet été lancée par missile depuis Kapuskin Yar mais l'explosion a eu lieu, délibérément ou par accident, à Aralsk, au centre du Kazakhstan.

2. Totsk

L'essai réalisé à Totsk, aux confins du sud de l'Oural, était d'un genre spécifique. M. Donald J. Bradley (op. cit. page 154) en donne la description suivante :

« Le 14 septembre 1954, à l'occasion d'exercices militaires courants près de Totsk dans la région d'Orenburg, un engin nucléaire de 40 kilotonnes explosa à une altitude de 350 m. Environ 40 000 soldats furent exposés dans cet exercice faisant partie d'une expérience pour étudier les effets des armes nucléaires (Los Angeles Times, 2

septembre 1992 ; Minatom et MOD 1996). Deux zones de contamination résultèrent de l'explosion : la zone épacentrale de l'explosion de 20 km de rayon et une 'trajectoire' de contamination de 210 km de long dans la direction nord-est. Ces zones comprenaient 57 villages d'une population totale de 39 000 personnes. De récentes études de santé humaine ont montré un taux plus élevé de mortalité par cancer pour ce groupe de populations que pour celui de la population rurale de la région d'Orenburg (Boev et coll., octobre 1996). Peu de temps après l'explosion, des exercices militaires furent dirigés à cet endroit à environ 10 km de Totsk. L'explosion détruisit également des forêts dans un rayon de 1 à 1,5 km. (Spaseniye, juillet 1992). »

Dans la région d'Orenburg, à 70 km du point zéro, la dose externe engagée maximale a été de 10 mSv et la moyenne de la dose externe engagée pour la population de 3 mSv (20 000 personnes dans la zone prise en considération).

LES ESSAIS NUCLEAIRES BRITANNIQUES

Les essais nucléaires britanniques présentent plusieurs spécificités qui méritent d'être signalées d'emblée spécialement dans une perspective comparative. Tout d'abord, ils ont été les moins nombreux si l'on excepte douze expériences de sécurité puisqu'on a compté 21 essais atmosphériques (données UNSCEAR notamment) et 24 essais souterrains.

En deuxième lieu, la puissance totale a été très limitée : 8,05 Mégatonnes pour les atmosphériques (10,2 pour la France et 20,7 pour la Chine), 2 Mégatonnes pour les souterraines. En troisième lieu, l'ensemble des essais atmosphériques s'est écoulé sur une période courte par rapport aux puissances nucléaires ayant procédé à des campagnes d'essais : six ans (1952-1958). Enfin, malgré cette ampleur limitée des essais britanniques, atmosphériques en particuliers, ils ont lieu dans une multiplicité de sites.

Ces caractéristiques déterminent quelque peu la recherche d'incidences qui paraissent à la fois ponctuelles et limitées.

I - De nombreux sites pour les essais les plus limités : les essais atmosphériques

Les 21 essais atmosphériques ont eu lieu sur cinq sites différents dont le tableau général ci-dessous donne la répartition et les caractéristiques en puissance notamment.

Site d'essais	Nombre d'essais	Puissance (en Mégatonnes)			Répartition de la puissance de fission (en Mégatonnes)		
		Fission	Fusion	Total	Localement et régionalem'	Dans la troposphère	Dans la stratosphère
Monte Bello Island	3	0,1	0	0,1	0,050	0,049	0,0007
Emu	2	0,018	0	0,018	0,009	0,009	0
Maralinga	7	0,062	0	0,062	0,023	0,038	0
Malden Island	3	0,69	0,53	1,22	0	0,56	0,13
Christmas Island	6	3,35	3,30	6,65	0	1,09	2,26
Total	21	4,22	3,83	8,05	0,07	1,76	2,39

(source : Rapport de l'UNSCEAR 2000 annexe C)

1. Les débuts : Monte Bello puis Emu et Maralinga

A la recherche d'un site sûr et adapté, éloigné de toute population importante, le Royaume-Uni a envisagé dès 1950 de réaliser ses premiers essais en Australie. Les perspectives d'une coopération avec les Etats-Unis avaient aussi permis de penser que ces expérimentations pourraient se faire sur un territoire sous contrôle américain : Enewetak aux îles Marshall où les essais américains avaient eux-mêmes lieu à ce moment, ou au Nevada, où il commençaient. Les contacts qui durèrent plus d'un an dans cette perspective, n'aboutirent pas, pour deux raisons semble-t-il : exigences des Américains quant à la communication de certaines caractéristiques des armes et quant à la limitation de la puissance à 25 kt par tir. L'accord fut donc confirmé entre la Grande-Bretagne et l'Australie, les îles Monte Bello, archipel situé au large des côtes Nord-Ouest de l'Australie étant retenu.

- Le premier tir eu lieu le 30 octobre 1952. D'une puissance de 25 kt, le dispositif fut tiré à 30 mètres sous l'eau dans le lagon d'une île de l'archipel de Monte Bello sous une frégate afin, notamment, de tester les effets d'une explosion nucléaire sur un navire de guerre (cf. opération Crossroads à Bikini en 1946 et tirs sous-marins en Nouvelle-Zemble).
- Les deux essais suivants eurent lieu dans un tout autre site en octobre 1953 à Emu, au milieu du désert d'Australie du sud à 900 km environ d'Adélaïde avec des puissances très limitée : 10 et 8kt (sur tour à 30 m au sol). Le premier de ces essais, dans des conditions météorologiques médiocres, semble avoir été à l'origine de retombées notables.
- Aucun essai n'eut lieu en 1954 et 1955. Les deux essais suivants furent réalisés de nouveau aux îles Monte Bello le 16 mai 1956 et le 19 juin 1956, ce dernier à 98 kt étant le plus puissant tiré en Australie, et étant encore évalué à 60 kt dans certains documents de référence.
- Des négociations avec le gouvernement de Canberra préciseront fin 1955 l'accord qui permit à la Grande-Bretagne d'installer un véritable site d'essais à Maralinga dans le désert d'Australie du sud, au sud d'Emu, lieu des essais de 1953, à un peu moins de 900 km d'Adélaïde.

Sept tirs de bombes nucléaires eurent lieu à Maralinga : 4 entre le 27 septembre et le 22 octobre 1956 et 3 entre le 14 septembre et le 9 octobre 1957 pour une puissance totale de 61,5 kt. Les expériences de sécurité, dont 12 sont comptées dans certaines statistiques s'ajoutent à ce nombre (cf. infra). Quatre tirs ont été réalisés sur tour (à une trentaine de mètres du sol), un au niveau du sol, un par avion (3 kt à 150 m de hauteur) et la dernière (25 kt) par ballon à 300 m de hauteur, ouvrant ainsi la voie à une technique pouvant limiter fortement la contamination.

2. Le stade du thermonucléaire : les îles Malden et Christmas

L'Australie ayant exclu dans l'accord formalisé en 1955-56 que des essais de bombes thermonucléaires puissent avoir lieu sur son sol (à Maralinga ou ailleurs), le gouvernement britannique choisit alors les îles Malden et Christmas pour poursuivre ses essais. Malden était alors une île corallienne inhabitée de 8 m de large sur 6 km de long située sous l'Equateur à 1600 km dans le Nord-Ouest de Bora-Bora (Polynésie française). Christmas (dénommée aujourd'hui Kiritimati) située à 700 km plus au Nord et au-dessus de l'Equateur, appartient à l'Archipel des « Line Islands » et fait partie de la République de Kiribati. L'île de Christmas elle-même est l'un des plus grands, sinon le plus grand atoll de l'Océan Pacifique (57 km x 39 km). Cet atoll est situé à 1800 km au Sud d'Hawaï et à 2 200 km de Tahiti.

➤ La première bombe thermonucléaire britannique (300 kt de puissance totale dont 100 kt pour la fusion) fut tirée le 15 mai 1957 comme les deux suivantes au large de Malden par avion à un peu plus de 2000 mètres d'altitude (720 et 200 kt).

➤ A Christmas furent réalisés six essais, tous thermonucléaires, pour une puissance totale de 6,7 Mégatonnes au minimum du 8 novembre 1957 au 23 septembre 1958. Le deuxième fut le plus puissant à 3 Mt. Trois d'entre eux furent, comme à Malden, tirés en altitude à partir de bombardiers *Valiant*, trois auraient été tirés sous ballons (plusieurs ballons pour un dispositif à 500 m de hauteur). Une autre série d'essais atmosphériques était prévue lorsque le gouvernement britannique décida en novembre 1958 de se joindre à la position prise par les Soviétiques et les Américains en faveur d'un moratoire de ce type d'essais. Contrairement aux deux superpuissances, la Grande-Bretagne ne recommença pas ces essais en 1961-62 lorsque celles-là les reprirent avec des puissances de tir extrêmement considérables.

➤ Christmas continua toutefois à servir de site d'essais puisque lors de la reprise des essais américains en avril 1962, ceux-ci y furent réalisés en vertu des accords de coopération passés avec le gouvernement britannique. Ces tirs aériens, semble-t-il, (ou par ballons) furent au nombre de 24 pour une puissance totale de 23,3 Mégatonnes entre le 25 avril et le 11 juillet 1962, six tirs ayant été égaux ou supérieurs à 1 Mégatonne, les plus puissants eurent lieu le 30 juin (7,65 Mt.) et le 11 juillet (3,88 Mt), soit en deux tirs davantage que la totalité des essais atmosphériques français ou britanniques.

Cette coopération anglo-américaine s'est également traduite par la réalisation de la totalité des essais souterrains britanniques (24 tirs) sur le site du Nevada (cf. infra).

3. Appréciations d'ensemble

Les dégagements de puissance de fission aux niveaux local et régional ont été perceptibles lors des essais de surface ou sur tour à Monte Bello, Emu et Maralinga, comme sur d'autres sites étrangers, ce que les informations disponibles permettent de juger. Les déplacements vers d'autres sites insulaires et plus isolés encore, le choix de techniques de tirs réellement moins ou non contaminantes, l'accent étant mis ici sur les tirs aériens davantage que sous ballon, ont permis d'éviter des risques substantiels que l'on peut rencontrer même avec de faibles puissances (cas du Nevada et de Semipalatinsk). On doit remarquer toutefois qu'à l'exception de Maralinga et d'Emu, aucun des autres sites n'a fait l'objet, semble-t-il, d'expertise ou à tout le moins d'étude.

II - Les incidences générales : les retombées

- Pour Malden et Christmas les retombées ont été minimales, ainsi que le confirme l'UNSCEAR (Rapport 2000 Annexe C)
- Australie : reconstitution des doses.

Différents travaux dans les années cinquante et l'étude de MM. Wise et Moroney (1985 et 1992) permettent de donner quelques éléments d'appréciation.

Les doses externes des retombées locales ne sont pas directement disponibles pour les essais de 1952 à juin 1956 (Monte Bello et Emu). Les doses corps entier d'irradiation externe sont estimées à moins d'un mGy dans toutes les localités habitées qui ont fait l'objet d'une surveillance mesurée.

Les sept tirs de 1956 et 1957 (séries dénommées Buffalo et Antler) ont donné lieu aux estimations suivantes pour quelques localités (85 localités ayant été prises en compte) :

*Dose externe moyenne corps entier estimée des retombées locales des essais
à Maralinga (Wise et Moroney, 1985)*

Essai : série et numéro	Localité	Dose externe corps entier (mGy)
Buffalo, test 1	Coober Pedy	0.2–0.68
Buffalo, test 1	Ingomar	0.17–0.3
Buffalo, test 1	McDouall Peak	0.03
Buffalo, test 3	Maralinga Village	0.003
Buffalo, test 4	Coober Pedy	0.045
Buffalo, test 4	Ingomar	0.12
Antler, test 1	Emu	0.05–0.37
Antler, test 2	Coober Pedy	0.04
Antler, test 2	Ingomar	0.02
Antler, test 2	Mabel Creek	0.035
Antler, test 3	Bulgannia	0.003
Antler, test 3	Ealbara	0.26–0.27
Antler, test 3	McDouall Peak	0.003
Antler, test 3	Mulgathing	0.1

A partir de ces données et en intégrant les autres essais rapportés aux puissances des tirs, les doses moyennes d'irradiation externe de la population australienne dans son ensemble se révèlent très basses : 0,0011 mGy pour la série « Mosaïque » (deux tirs de juin 1956 à Monte Bello), 0,004 pour la série « Buffalo » et 0,0031 mGy pour la série « Antler » à Maralinga).

Les doses d'irradiation interne sont données pour l'ensemble des douze tirs par le tableau ci-dessous (Wise et Moroney 1985)

Moyenne des doses équivalentes résultant des essais britanniques en Australie (1952-1957)

Série	Essai	Moyenne d'équivalent de dose efficace (mSv)	Equivalent ou dose équivalente efficace (homme-Sv)
Hurricane	1	0.012	110
Totem	1	0.007	70
Totem	2	0.006	60
Mosaic	1	0.001	10
Mosaic	2	0.0055	52
Buffalo	1	0.0088	83
Buffalo	2	0.0012	11
Buffalo	3	0.0059	56
Buffalo	4	0.011	101
Antler	1	0.0003	3
Antler	2	0.0030	28
Antler	3	0.0125	118
Total (arrondi)		0.07	700

L'équivalent de doses effective individuelle moyenne s'établit à 0,007 mSv pour la totalité des essais effectués en Australie. Le chiffre de 700 homme.Sv pour l'Australie peut se comparer avec les 200 000 homme.Sv évalués à partir des essais sur le polygone de Semipalatinsk au Kazakhstan.

A côté des expositions aux retombées locales et régionales lors des essais dont il apparaît en tout état de cause qu'elles ont été faibles pour l'ensemble de la population, des effets plus substantiels pour l'environnement ont été enregistrés sur le site de Maralinga, dus notamment aux expériences de sécurité qui y ont été menées.

Vos rapporteurs ont effectué en septembre 2001 une mission en Australie à Canberra, Adelaïde et Melbourne où siège l'autorité de sûreté nucléaire (ARPANSA) chargée notamment du suivi des sites d'essais et des travaux de décontamination.

Ils ont été reçus avec courtoisie et efficacité par les représentants de l'ARPANSA et ceux du Ministère des affaires étrangères et du commerce, du Ministère des anciens combattants (Commonwealth Department of Veterans'Affairs) ainsi que par les experts qui ont participé aux évaluations et au suivi des travaux à Maralinga.

L'ambassade de France en Australie a contribué de la même façon à l'organisation de la mission et à sa réalisation dans d'excellentes conditions.

Une visite technique de l'ensemble du site de Maralinga, y compris le secteur de Taranaki (cf. infra) a eu lieu le 12 septembre 2001. Elle a permis de prendre la mesure non seulement de l'opération d'ensemble de la décontamination, mais encore de la situation de départ (1967) et des évaluations et expertises intermédiaires.

III - La décontamination du site de Maralinga

Outre les 21 essais atmosphériques qualifiés « d'essais majeurs », la Grande-Bretagne a procédé à 12 essais de sécurité qui ont comporté un léger dégagement énergétique nucléaire et qui se sont tous écoulés dans le même secteur, celui du désert du Sud australien, principalement à Maralinga et très accessoirement à Emu. D'autres expérimentations s'ajoutent à ces 12 explosions et ce sont au total 550 expérimentations, assez diverses, auxquelles il a été procédé de 1953 à 1963, et en de nombreux endroits sur le même site de Maralinga dont la surface était de 32000 km². Ces essais visaient notamment à s'assurer de la sécurité des bombes en cas d'accident de transport, au combat, et des comportements des différents éléments composant le dispositif.

Ce sont principalement 24 kg de plutonium et 100 kg de beryllium qui ont été répandus à travers le site de Maralinga, spécialement dans le secteur de Taranaki, et plus particulièrement lors des expérimentations réalisées à la fin de la période.

En 1967, le gouvernement britannique fit mener une opération de « nettoyage final » du site de Maralinga étant postulé qu'il ne devrait pas y avoir d'établissement humain significatif à l'avenir. On a alors labouré et dispersé les éléments les plus dangereux dans les délais les enterrant à une très faible profondeur pour « diluer » la radioactivité.

En 1985, la Commission royale sur les essais nucléaires britanniques en Australie a tout d'abord signalé que le nettoyage de 1967 (« opération Brumby ») avait été mené dans la hâte, pour atteindre des objectifs politiques, et dans certains cas, avait aggravé la situation pour toute future opération de décontamination (« clean-up »). Elle a constaté ensuite la nécessité d'une véritable décontamination aux frais de la Grande-Bretagne et dans la perspective de rendre le site à nouveau habitable pour les Aborigènes. Des examens gammaspectrométriques par voie aérienne permirent en 1987 de compléter les expertises et de préciser notamment la contamination par le césium 137 et l'américium 241.

A la lumière des expertises et des options possibles qu'elles ont dégagées, il a été conclu un accord entre le gouvernement fédéral australien, celui d'Australie du Sud, les représentants Aborigènes locaux et le gouvernement britannique au terme duquel ce dernier prendrait en charge 50 % du coût de l'opération de décontamination dont le total s'est élevé à 100 millions de dollars australiens, et sur le plan technique l'ensemble du site devrait pouvoir de nouveau être habité par ses habitants, les Aborigènes, selon leur mode de vie traditionnel, ce qui impliquerait que dans certains secteurs le passage et la chasse soient libres, mais que l'installation sédentaire y soit proscrite. Cette option a été retenue par les Aborigènes eux-mêmes. 90 % de la surface du site est donc de nouveau accessible sans restriction, le maximum de la dose annuelle étant de 1mSv ; pour les 120 km² à accès restreint, la dose ne dépasse pas 5mSv.

La réalisation technique a impliqué sur trois secteurs principaux dont celui de Taranaki, le raclement de 2,15 km² de sol contaminé au plutonium et l'enfouissement sous des couches de 5 mètres de terre non contaminée. Des véhicules pressurisés spéciaux ont été nécessaires pour se protéger des poussières de plutonium. Aucune irradiation mesurable n'a été enregistrée, la surveillance individuelle des véhicules ayant été systématique.

Par ailleurs, dans l'ensemble des opérations de décontamination et de réaménagement était prévue la vitrification dans des puits de ces déchets radioactifs, et autres, abandonnés sur le site. Il s'agissait d'une vitrification in situ réalisée avec un dispositif conçu spécifiquement. Onze puits de débris furent ainsi testés, mais un accident technique intervenu lors des travaux (sans victime ni irradiation) entraîna l'arrêt de cette méthode de retraitement, l'incertitude quant au contenu des puits expliquant l'événement, car les expérimentateurs britanniques n'avaient pas laissé d'informations, et rendant risquée la reprise du processus. 36 autres puits ont ainsi été vidés, puis leur contenu brûlé ; celui-ci s'étant finalement révélé beaucoup moins radioactif qu'on ne le supposait.

IV - La recherche d'incidences sanitaires

L'absence d'incidence connue et constatée sur les populations en Australie ayant été rappelée, la question des personnels militaires ou civils ayant participé aux essais a été soulevée, en Australie, en Grande-Bretagne et en Nouvelle-Zélande. En effet, 22.300 personnes ont été décomptées comme ayant pris part d'une manière ou d'une autre, aux essais sur les trois sites australiens (Monte Bello, Emu et Maralinga) et sur les deux sites insulaires relevant de la souveraineté britannique (Malden et Christmas) ; elles étaient principalement de nationalité britannique, mais il y avait également des Australiens, des Néo-Zélandais (au titre de la Marine), et quelques Canadiens et Fidjiens.

1. Les éléments factuels

La répartition de ces personnels, presque exclusivement militaire, était la suivante : 40 % pour l'armée de l'air, 30 % pour la marine, 27 % pour l'armée de terre et 3 % de civils. Environ les trois quarts des participants militaires aux essais ne furent présents sur le site, quel qu'il soit, que pour un seul d'entre eux, mais pour une petite minorité, cette présence alla jusqu'à 8 essais. Le nombre de « personnes/séjour » s'élève à 27 500, sachant qu'en effet une personne peut avoir effectué plus d'un séjour sur l'un de ces sites et est donc comptée pour autant une fois que de séjours.

Les informations relatives aux expositions proviennent de l'AWE (Atomic Weapon Establishment). Les dosimètres avaient été étalonnés en Roentgen, la convention de conversion a été établie à 1 R = 10 mSv dose équivalente corps entier.

Le minimum enregistrable était pour la plupart des essais en Australie : 0,2 mSv, mais dans certains cas 0,3 voire 0,5 mSv (deux premiers essais à Christmas).

Si la surveillance dosimétrique individuelle a été effectuée pour 96 % des personnels lors du premier essai (Hurricane en 1952 à Monte Bello), elle s'est située entre 50 % et 70 % à Emu et Maralinga, elle n'était plus que de 14 % lors des derniers (série Grapple en 1958) ; la politique dans ce domaine avait en effet évolué et seules les personnels les plus exposés étaient à la fin suivies individuellement.

Sur les 5686 personnes enregistrées par l'AWE, 3422 sont mentionnées avec une dose nulle et 2264 avec une dose non nulle. 483 sont mentionnées avec des doses de 5 mSv à 50 mSv et 81 au-dessus de 50mSv.

La répartition entre les trois armes (ainsi que l'AWE) pour les personnels ayant reçu les radiations est donnée par le tableau ci-après.

Effectifs et dose collective en homme.mSv répartis en niveaux de dose et par unité

Niveau de dose (mSv)	Catégorie d'unité militaire ou civile									
	Marine		Armée de Terre		RAF		AWE		Total	
	Nbre	Dose	Nbre	Dose	Nbre	Dose	Nbre	Dose	Nbre	Dose
0.01-0.99	113	43	267	129	349	161	159	76	888	410
1.00-4.99	48	130	78	193	109	219	110	260	345	802
5.00-9.99	25	184	50	304	33	233	52	372	160	1,094
10.00-49.99	36	668	49	1,296	69	1,590	88	1,970	242	5,523
50.00-99.99	0	0	4	275	32	2,349	8	627	44	3,251
>100.00	0	0	0	0	34	5,363	3	553	37	5,915
Total	222	1,026	448	2,197	626	9,915	420	3,858	1,716	16,995

Plus de la moitié de la dose collective totale (16 995 homme.mSv) a été reçue par des aviateurs (RAF) avec 9 915 homme.mSv, les personnels de l'AWE ont reçu 3 858 homme.mSv. Parmi les cinq groupes les plus exposés et isolés pour les besoins de l'étude épidémiologique, figuraient en effet les pilotes d'avions pénétrateurs du nuage et les équipes de décontamination de ces appareils.

La Commission royale sur les essais nucléaires britanniques en Australie (Canberra 1985), remarqua à ce sujet que les instructions de vol dans le nuage pour effectuer les prélèvements, de même que les procédures de décontamination au sol n'ont

fait l'objet de prescriptions bien adaptées au risque qu'à partir des essais de septembre 1956 à Maralinga (série Buffalo).

La répartition des doses collectives par série d'essais indique qu'outre le premier essai (Hurricane, un seul tir avec 2 470 homme.mSv) c'est la dernière série (Grapple Z à Christmas) qui totalise la dose la plus élevée : 3 814 homme.mSv, suivie de la série Buffalo (septembre 1956) avec 2 156 homme.mSv.

2. Les études épidémiologiques

2.1 L'étude au NRPB

L'étude essentielle concernant les participants aux essais nucléaires britanniques ont été réalisées en deux temps par le NRPB (National Radiological Protection Board, Conseil National de Protection radiologique). En effet, une première étude dont la période de prise en compte s'arrêtait au 1^{er} janvier 1984 a été poursuivie par la poursuite des mêmes travaux, sur des effectifs dont la détermination a encore été affinée et ce jusqu'au 31 décembre 1990. La nouvelle étude a été publiée en novembre 1993.

L'essentiel du résumé détaillé de l'étude montre nettement l'absence d'impact notable de la participation aux essais sur les risques sanitaires connus par les intéressés avec toutefois un léger risque de survenance de leucémie pendant les premières années après les essais.

« Une étude de suivi a été précédemment réalisée sur la santé des personnes ayant participé aux essais et programmes d'expérimentation britanniques d'armes nucléaires dans l'atmosphère qui se sont déroulés en Australie et dans l'océan Pacifique entre 1952 et 1967. Les participants ont été identifiés d'après les archives du Ministère de la Défense et un groupe témoin correspondant a été sélectionné d'après les mêmes archives. On a alors comparé dans les deux groupes les taux de mortalité et la fréquence du cancer déterminés d'après les certificats de décès et les registres nationaux de déclaration du cancer. Les chiffres de décès observés ont également été comparés avec ce qu'ils auraient été si ces personnes avaient connu les taux de décès enregistrés pour tous les individus des mêmes âges pendant les mêmes années en Angleterre et au pays de Galles. Les résultats de cette étude ont abouti à trois hypothèses : [premièrement,] que la participation aux essais pouvait avoir entraîné de légers risques de leucémie (en excluant la leucémie lymphatique chronique) et de myélome multiple, [deuxièmement,] que la participation aux essais n'entraînait pas un risque décelable de tout autre cancer ou de toute autre affection ayant un taux de mortalité appréciable, [troisièmement,] que les participants aux essais fumaient moins que d'autres individus comparables des forces armées britanniques ou employés par l'Établissement des armes (AWE).

La présente étude prolonge le suivi des participants aux essais ainsi que des témoins à raison d'une période de 7 années supplémentaires, afin de contrôler les trois hypothèses résultant de l'étude précédente et de poursuivre l'examen des effets à long terme de la participation aux essais sur la santé. Les individus étudiés sont, d'une part, ceux ayant fait l'objet de l'étude antérieure, plus une centaine d'autres participants découverts dans les documents d'archives du Ministère de la Défense depuis l'étude précédente, moins quelque quinze cents hommes dont le risque d'exposition aux radiations n'était pas supérieur à celui du grand public. Au total, 21 358 participants aux essais et 22 333 témoins ont ainsi été étudiés, parmi lesquels 99,8 % ont été suivis jusqu'au 1er janvier 1991.

Les 2488 décès supplémentaires parmi les participants aux essais et les témoins qui ont été enregistrés lors de la période supplémentaire de suivi après le 31 décembre 1983 ont fourni des données permettant de contrôler ces hypothèses. Pendant la période supplémentaire, les taux de mortalité dus à toutes les causes et à tous les néoplasmes, ainsi que le taux d'incidence de tous les néoplasmes ont été très similaires dans les deux groupes.(...) Seuls 6 nouveaux décès par leucémie ont été observés chez les participants aux essais, à comparer aux 10,55 prévisibles d'après les taux nationaux et le RR de la fréquence de leucémie chez les participants aux essais par rapport aux témoins au cours de la période supplémentaire a été de 0,64 (IC de 90 %, 0,28 à 1,44). Trois décès supplémentaires par myélome multiple ont été observés parmi les participants aux essais, à comparer aux 6,50 prévus d'après les statistiques nationales et le RR correspondant de la fréquence de leucémie chez les participants aux essais par rapport aux témoins a été de 0,71 (IC de 90 %, 0,22 à 2,07). Pour tous les néoplasmes et toutes les autres affections, la mortalité comparée aux taux de mortalité nationaux a été exceptionnellement faible au cours des 10 années après le début de la participation aux essais (taux de mortalité normalisés = TMN) de 0,72 et 0,54 respectivement), ce qui s'explique en partie par la sélection d'hommes de bonne constitution et en bonne santé pour la participation aux essais. En outre, on peut supposer que les effets éventuels de la participation aux essais sur la fréquence de néoplasmes autres que la leucémie sont concentrés dans la période postérieure aux 10 premières années après le début de la participation aux essais. Les indices d'effets à long terme éventuels de la participation aux essais ont, donc, été recherchés après avoir exclu les 10 premières années d'observation. Il a été constaté que la mortalité parmi les participants aux essais demeure faible après cette exclusion pour tous les néoplasmes et pour toutes les autres causes de décès (TMN de 0,84 et 0,82, respectivement) et les taux chez les participants aux essais et chez les témoins demeurent très similaires (RR = 0,97, IC de 90 % 0,91 à 1,04) pour la fréquence de tous les néoplasmes et RR = 1,02, IC de 90 % 0,96 à 1,08 pour la mortalité due à toutes les causes de décès autres que les néoplasmes). (...)

Pour la leucémie, la probabilité d'un effet éventuel de l'exposition aux radiations est plus forte dans la période de 2 à 25 ans après les essais que 10 ans ou plus après ces essais. Dans la période de 2 à 25 ans après les essais, 20 décès par leucémie ont été observés contre 16,29 prévisibles d'après les taux nationaux ($p = 0,38$).

La fréquence est significativement supérieure à celle des témoins (RR = 3,45, 1C de 90 % 1,72 à 7,10), mais le risque n'est pas concentré parmi les personnes le plus susceptibles d'avoir été exposées aux radiations, ni parmi celles ayant participé à un essai particulier et l'excédent paraît devoir être attribué principalement à un déficit chez les témoins, dont la mortalité a été anormalement faible (TMN = 0,34 au cours de la période de 2 à 25 ans), alors qu'elle a rejoint le taux de mortalité national pendant la période supplémentaire de suivi (TMN = 0,98 pour la période du 1 janvier 1984 au 31 décembre 1990).

La conclusion est que la participation au programme d'essai d'armes nucléaires n'a pas eu un effet décelable sur l'espérance de vie des participants, ni sur leur risque de développer un cancer ou d'autres affections. L'excédent des chiffres de leucémie parmi les participants aux essais par rapport aux témoins au cours de la période de 2 à 25 ans après les essais est probablement dû au hasard, même si l'on ne peut écarter totalement l'hypothèse que la participation aux essais ait pu entraîner un léger risque de leucémie dans les premières années après les essais. Les hypothèses suggérées par une étude antérieure selon lesquelles les participants pourraient avoir subi de légers risques de myélome multiple et que les participants pourraient avoir moins fumé que les témoins correspondants ne sont pas confirmées par les données supplémentaires exploitées et les écarts paraissent maintenant probablement dus au hasard ».

2.2 L'étude sur les marins néo-zélandais

Les 528 marins néo-zélandais recensés comme ayant participé aux essais nucléaires en 1957 et 1958 aux îles Malden et Christmas (série Grapple) ont fait l'objet d'une étude épidémiologique⁵⁵ prenant en compte toute la période depuis les essais jusqu'en 1987, puis d'une étude complémentaire, comme pour celle du NRPB (cf. supra) étendant la période étudiée jusqu'à 1992.

Ces marins étaient pour l'essentiel affectés aux navires chargés principalement des tâches météorologiques et en second lieu de fonctions diverses : sécurité, sauvetage-surveillance, prélèvement d'échantillons, d'eau notamment. Ces navires étaient postés de 20 à 150 miles du point zéro au moment du tir.

La cohorte des 528 marins ayant participé aux essais a été comparée à un groupe de 1 504 autres marins néo-zélandais n'ayant pas participé aux essais.

La conclusion de la première étude (1990) peut être ainsi résumée : bien que les effectifs soient faibles, les déductions pour la leucémie sont similaires à celles qui ont été faites dans l'étude sur les participants britanniques. Ainsi, un petit nombre de

⁵⁵ Auteur principal Neil Pearce « Cancer Courses and control » (1990). Rapid Science publishers 1997. « Suivi complémentaire des participants de Nouvelle-Zélande aux essais britanniques d'armes nucléaires dans le Pacifique ».

leucémies et éventuellement quelques autres cancers hématologiques, peuvent avoir résulté de la participation aux essais.

La seconde étude (1997) conforte cette déduction en ajoutant que ce suivi complémentaire renforce la constatation qu'il n'y a pas augmentation de risques de cancer non hématologique ou pour d'autres causes de mortalité non cancéreuse pour les participants aux essais.

2.3. l'éventuel recours à des « techniques radiobiologiques »

Le recours à des indicateurs biologiques d'exposition ou de risque fait l'objet de suggestions de la part de diverses associations en vue d'identifier des personnes qui, ayant participé à des essais nucléaires, auraient été irradiés sans en avoir connaissance par ailleurs. Ces propositions sont plus particulièrement faites au sujet des essais britanniques et en particulier des personnels néo-zélandais.

Sans entrer dans une revue détaillée des techniques qui sont ainsi évoquées, on peut indiquer ici que parmi les quatre catégories d'analyses radiobiologiques envisagées, trois d'entre-elles sont à exclure d'emblée soit parce qu'elles ne peuvent viser que des expositions à de fortes, voire très fortes doses, et qu'il n'y a pas de relation dose-effet qui puisse être établie, soit parce que les observations faites ne sont pas spécifiques d'une exposition radiologique et qu'en outre certaines situations peuvent fausser les résultats (tabagisme). En tout état de cause, les interprétations sont souvent impossibles.

Seule une catégorie de techniques d'examen radiobiologiques pourrait correspondre à l'objectif recherché à défaut de répondre pleinement à la question. Il s'agit des analyses hématologiques du type FISH visant l'instabilité génomique par un suivi des « anomalies stables » (ou des réarrangements chromosomiques).

Ces analyses peuvent en effet permettre de retrouver la trace d'irradiations anciennes, de plusieurs décennies par exemple, mais il y a quand même une limite temporelle dans la mesure où, à côté des « réarrangements » qui sont caractéristiques d'une irradiation ancienne, peuvent, avec le vieillissement, apparaître des réarrangements qui se mêlent aux premières sans être pour autant repérables.

Par ailleurs, pour que ces réarrangements ou anomalies stables soient lisibles pour la recherche d'une contamination, il faut que cette dernière ait été importante, à partir d'un seuil situé entre 200 et 300 mSv, et reçue en une seule fois.

On voit donc que pour la France, même le pilote de *Vautour* le plus exposé (180 mSv) de tous les essais, n'aurait pas été repéré par un tel examen. Il faut en outre disposer d'un groupe de référence pour comparaison systématique.

Enfin, ce type d'examen qui est coûteux, n'a rien d'inédit puisqu'il est pratiqué depuis une vingtaine d'années sur les victimes du bombardement d'Hiroshima.

Il pourrait, en fait, s'adresser à des populations ou des personnels militaires qui ont été sérieusement exposés, et à leur insu, dans des conditions où aucune information ne leur était donnée quant aux risques accidentels ou non qu'une activité nucléaire, et pas seulement militaire, a gravement menacé dans un passé lointain mais pas trop lointain non plus.

LES ESSAIS NUCLEAIRES CHINOIS

Dernière grande puissance nucléaire à avoir engagé des essais en 1964, la Chine a aussi été la dernière à réaliser un tir atmosphérique le 16 octobre 1980.

Tous les observateurs s'accordent à constater la rapidité de ses progrès tant pour l'arme elle-même que pour les vecteurs utilisés.

Les essais ont été réalisés sur un site unique en Chine (sous réserve de tirs de missiles depuis un pas de tir spécifique) contrairement à toutes les autres puissances nucléaires qui en ont changé ou qui ont disposé simultanément de deux ou de plusieurs sites d'essais.

Le nombre d'essais atmosphériques auxquels la Chine a procédé (22) reste très limité et du même ordre que celui de la Grande-Bretagne (21 si l'on en exclut les essais de sécurité). Elle a par contre cumulé, avec 22 Mégatonnes, une puissance totale qui dépasse nettement celle de la France (10,2) et de la Grande-Bretagne (8,1) réunies. Si l'on y ajoute, toujours en terme de puissance totale, les essais souterrains, le rapport entre les trois pays reste voisin :

- Chine : 22 Mt
- France : 13 Mt
- Grande-Bretagne : 10 Mt

Après la présentation des conditions dans lesquelles les essais ont été réalisés, on abordera la question des incidences de ceux-ci.

I - Conditions de réalisation des essais

Créé en 1959 dans une région complètement désertique de la province du Sinkiang, le site d'essais nucléaires du Lob Nor est, de beaucoup, le plus étendu de tous avec 100 000 km² (Semipalatinsk : 5 180, Nevada : 3 500). Les premières localités peuplées en dehors du site se trouvent à 400 km dans l'Est de celui-ci. Tous les types d'essais ont pu y avoir lieu.

1. Les essais atmosphériques

➤ Les vingt deux essais atmosphériques se sont répartis à peu près régulièrement de 1964 à 1980, une concentration étant toutefois notable en 1966 (3 tirs) et entre 1976 et 1978 (six tirs).

Les essais atmosphériques représentent 93 % de l'ensemble de la puissance des essais réalisés en Chine. Les essais les plus importants ont été concentrés sur la période 1967-1970 où sur les 5 tirs qui ont eu lieu, 4 atteignèrent 3 Mégatonnes. Deux tirs importants ont eu lieu après cette période : celui de l'année 1973 (2,5 Mt) et le plus puissant de tous (4 Mt) en novembre 1976. Les seize autres tirs représentent ainsi 2,2 Mt ce qui correspond à une majorité de tirs autour de 20 kt chacun. La première bombe à hydrogène intervint en juin 1967 (6^{ème} tir atmosphérique) avec une puissance de 3 Mt, alors qu'avaient eu lieu en 1966 deux tirs avec des « bombes dopées » (lithium 6).

Les périodes de tirs sont regroupés principalement sur deux périodes : septembre-octobre (près de 40 % de l'ensemble des tirs), et mai-juin (25 %), les conditions climatiques pourraient expliquer cette concentration.

➤ Les techniques de tirs ont été majoritairement aériennes, soit par avion (cas notamment de la première bombe à hydrogène) à 3 000 mètres d'altitude, soit par missile à des altitudes très variables. Le tir sur tour (30 mètres, puis 100 mètres à partir du deuxième essai de ce type) ne fut pratiqué que 6 fois. A l'instar de ce qui avait été réalisé à Semipalatinsk, de nombreux éléments d'équipements urbains ont été construits sur le polygone dans le périmètre relativement proche du point zéro pour des expérimentations ; comme sur la plupart des sites, du matériel militaire (véhicules, avions, etc...) a également été exposé dans ce cadre.

2. Les essais souterrains

Au nombre de 22, leur puissance cumulée est de 1,5 mégatonne environ. Après un premier essai en 1969, le deuxième n'est intervenu qu'en 1975 et une nouvelle interruption d'octobre 1978 à octobre 1982. Le dernier a eu lieu en juillet 1996. Une grande majorité des essais semble avoir été réalisée dans des puits très profonds. Le plus puissant tir souterrain chinois (de 650 kt) a eu lieu en mai 1992. Aucun phénomène de « cratère » ne semble avoir été observé. Quelques tirs en tunnel ont également eu lieu.

II - Les incidences éventuelles

➤ Les indications dont on dispose actuellement sont très limitées ainsi qu'en atteste le rapport de l'UNSCEAR 2000 (annexe C) ci-après mais elles permettent de préciser l'orientation générale de retombées par rapport à la puissance dégagée :

« Les informations concernant les dépôts locaux consécutifs à ces essais sont limitées. Des ballons furent utilisés pour suivre la trajectoire des nuages de déchets, et des instruments aéroportés et basés au sol furent utilisés pour contrôler les niveaux de radiation. Des estimations des irradiations furent réalisées sur une zone située dans la direction du vent à une distance de 800 km. Les estimations des irradiations externes dans des villes, plus ou moins grandes, dans un rayon de 400 à 800 km du site d'essais de la province de Gansu allaient de 0,02 à 0,11 mSv (tableau ci-après), avec une moyenne de 0,04 mSv pour trois essais, ce qui représentait plus de 90 % de la dose résultant de tous les essais chinois. On supposa une occupation des maisons à 80 % et un facteur de protection des bâtiments de 0,2. Une évaluation rétrospective des doses basée sur un échantillonnage des sols fut réalisée de 1987 à 1992. La dose engagée provenant du ¹³⁷Cs fut estimée de l'ordre de 1,5 à 10 mSv dans la province nord-ouest de Gansu »⁵⁶ ».

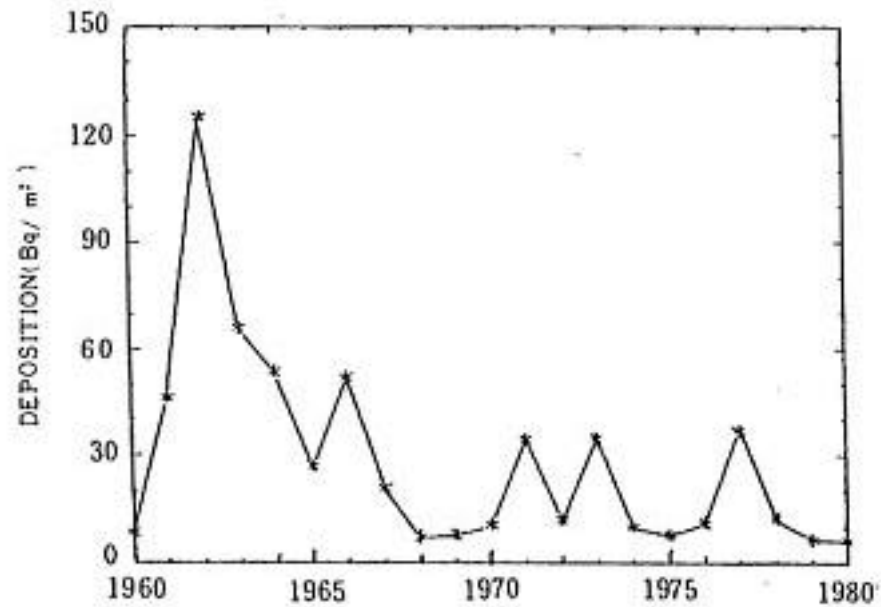
Estimation des doses efficaces d'exposition externe dans les localités situées de 400 à 800 km sous le vent du site d'essais du Lob Nor

Localité	Population	Distance du site (km)	Dose absorbée dans l'air (mGy)	Dose efficace (mSv)
Xihu)	60 000	500	0,07	0,2
Anxi)			0,06	0,2
Tashi)			0,10	0,3
Qiaowan	Village	560	0,14	0,04
Yumenzhen)	159 000	600	0,12	0,03
Yumanshi)			0,02	0,006
Jinta	99 000	740	0,45	0,11
Jiayuguan	89 000	720	0,44	0,11

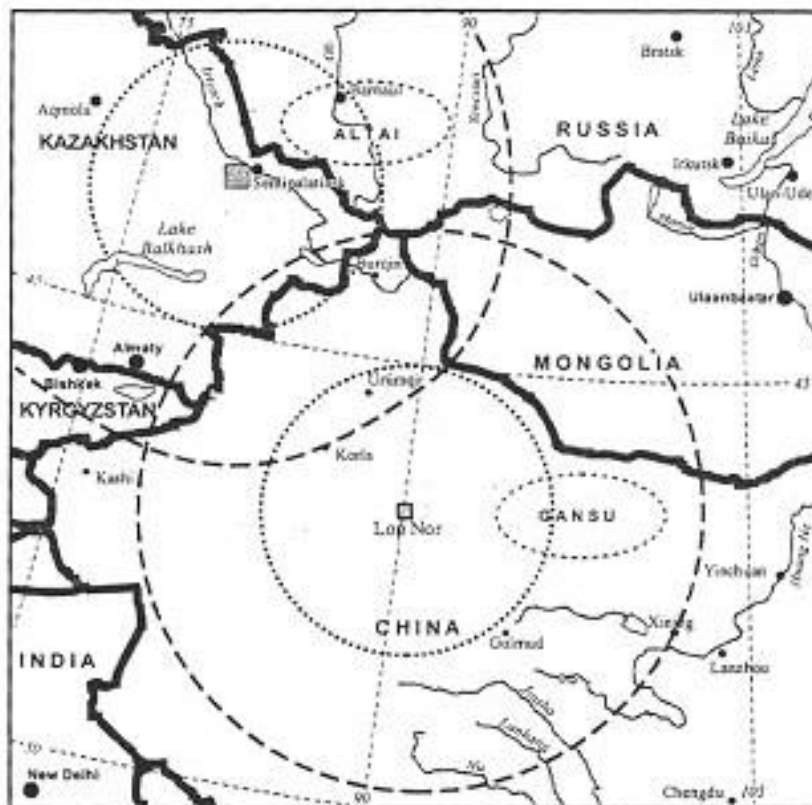
Depuis la fin des années cinquante, une surveillance de la radioactivité à travers la mesure d'ensemble des rayonnements β a été assurée sur différents points du territoire chinois. Ce graphique ci-dessous retrace ainsi l'évolution de la radioactivité. Il montre notamment un maximum en 1962 qui, selon SCOPE/59 (op.cit), « était le résultat des retombées précoces des explosions d'armes nucléaires en 1962 en Asie Centrale ». Ces plus petits pics intervenues en 1966,

⁵⁶ UNSCEAR – Rapport 2000 – Annexe C

1971, 1973 et 1977 enregistrent la contamination radioactive des essais nucléaires menés en Chine pendant ces années-là ».



La position du site de Semipalatinsk et les retombées à l'origine desquelles il se trouve lors de toute la période des essais atmosphériques (1949-1962) ainsi que divers types de tirs souterrains non confinés expliquent en effet cette situation. La carte présentée dans le rapport de l'UNSCEAR 2000 (Annexe C) illustre bien cette situation des deux sites d'essais l'un par rapport à l'autre :



Le cercle pointillé intérieur donne la distance à 500 km du centre des sites, le cercle tireté, la distance de 1000 km. Les zones ayant fait l'objet de mesures particulières (Altai et Gansu) sont signalées par des ellipses

➤ Des contaminations par l'iode 131 ont été relevées dans certaines régions de Chine. Les trajectoires des retombées se sont naturellement révélées dépendantes de la situation météorologique et de l'évolution du temps ; la dispersion peut ainsi se révéler aléatoire. Le tableau ci-dessous, présenté par Scope/59 (op. cit.) donne un aperçu de ces dépositions dans certaines régions chinoises où celles-là ont été les plus fortes :

Retombées d'Iode 131 en kBq m⁻² dans certaines régions de Chine

Nombre d'essais (et date)	Région	Retombées d'Iode 131
4 (27 octobre 1966)	Xi'an	0,33
5 (28 décembre 1966)	Shenyang	4,8
12 (7 janvier 1972)	Lanzhou	5,1
15 (17 juin 1974)	Lanzhou	10
18 (17 novembre 1976)	Hohhot	0,22
22 (16 octobre 1980)	Xining	10

Source : Liu Ying and Zhu Changshou - 1996

Les estimations de doses à la thyroïde pour des adultes sont données par le tableau ci-après. Les doses pour les enfants doivent être multipliées par un facteur d'au moins 10 (cf. Nevada étude du NCI) :

Région	Dose à la thyroïde (mGy)	Dose efficace (mSv)
Changchun	0,16	0,0081
Shenyang	2,2	0,11
Taiyuan	0,059	0,003
Xi'an	0,14	0,0072
Hangzhou	0,15	0,0077
Changsha	0,11	0,0054
Nanning	0,097	0,005
Hohhot	0,97	0,05
Xining	2,0	0,1
Lanzhou	2,5	0,13

Source : Liu Ying and Zhu Changshou – 1996

LES ESSAIS NUCLEAIRES EN INDE ET AU PAKISTAN

Les essais nucléaires de l'Union indienne et ceux du Pakistan étant tous souterrains et réalisés dans un « climat » d'hostilité, donc de secret, les incidences éventuelles de telles expérimentations, au demeurant en nombre très limité à ce jour, six pour chaque pays, sont pour le moins difficiles à saisir. On ne peut que rappeler ici les éléments factuels qui caractérisent ces tirs souterrains.

I – L'Inde

Le premier essai nucléaire indien a eu lieu en 1974, dans le désert du Rajasthan (Pokran). Sa puissance indiquée était de 12 kt et semble avoir été ultérieurement révisée à la baisse (8 kt). Le gouvernement indien qui l'avait présenté comme une « explosion pacifique » avait pris des dispositions particulièrement orientées vers un confinement absolu de ce tir ; il ne semble pas, d'ailleurs, qu'un relâchement dans l'atmosphère ait été relevé.

Dans la même région ont eu lieu du 11 au 13 mai 1998 cinq autres tirs souterrains. Ils ont été présentés par les autorités indiennes de la manière suivante : un premier essai, effectué le 11 mai 1998 concernait trois engins : l'un à 12 kt environ, un autre, thermonucléaire à 43 kt et enfin un engin subkilotonnique. Le surlendemain, deux engins de 0,2 et 0,6 kt auraient été tirés simultanément. Ces indications de puissance ont été contestées par des centres d'observation sismique étrangers, français entre autres. L'Inde elle-même a corrigé ses premières estimations en indiquant que la puissance totale des trois premiers tirs se situeraient entre 25 et 30 kt.

II – Le Pakistan

Le Pakistan a procédé à six essais au total le 28 et 30 mai 1998, moins de vingt jours donc après les cinq essais indiens de 1998. La puissance totale aurait été de 50 kt (une de 25 kt, deux de 12 kt et trois subkilotonniques). Pour ce pays également, les relevés extérieurs donnent des puissances inférieures, entre 6 et 16 kt pour la première série et 4 à 6 kt pour la seconde. Ces essais ont eu lieu dans la région de Chagai (province du Balouchistan), non loin de la frontière afghane.

CONCLUSION DU RAPPORT

Sur la situation des atolls :

L'étude de l'AIEA et celle de la Commission géomécanique internationale ont analysé les questions qui ont été soulevées au sujet des incidences des essais nucléaires, y compris certains aspects des essais atmosphériques.

Le temps qui a été consacré à ces analyses et les moyens mis en œuvre attestent de l'exhaustivité de ces travaux qui ont fait de ce Centre d'expérimentations du Pacifique un site très ausculté.

Ces analyses concluent pour l'instant à l'absence d'anomalie radiologique dans des atolls qui, de toute façon, n'ont jamais été habités. Quant à la situation géomécanique, pour laquelle la stabilisation générale est confirmée, elle suppose une surveillance pérennisée, surveillance qui correspond à ce qui a été demandé et constaté par la Commission géomécanique internationale.

En définitive :

Nous avons pu, dans ce rapport, réétudier, sans concessions, dans tous leurs effets, l'ensemble des essais nucléaires français depuis les décisions initiales en 1947 jusqu'aux derniers essais en 1996, soit une période d'une quarantaine d'années.

Ces essais ne se sont pas réalisés sans altérer l'environnement des sites utilisés et sans prendre des risques humains. On peut toutefois considérer que ces effets ont été limités, même si, quarante ans plus tard, des hommes se plaignent d'hypothétiques effets sur leur santé. Enfin, par delà les constats rassurants des instances internationales, il convient de continuer à assurer la surveillance des atolls de Mururoa et de Fangataufa.

Toutes ces conséquences sont dérisoires comparées à celles, aujourd'hui encore difficilement mesurables, des essais réalisés par les deux grandes puissances à partir de 1945. Nous avons vécu une période historique dite de guerre froide, durant laquelle les Etats-Unis et l'Union Soviétique se préparaient purement et simplement à la guerre.

Dans ce contexte de hâte, de course à l'armement, à la puissance, à leur démonstration, le respect des sites des essais et des êtres humains est passé au second plan, au Nevada ou dans le Pacifique, au Kazakhstan ou en Nouvelle-Zemble. Les deux grands Etats dominants ont poussé au bout des expériences possibles la puissance terrifiante de l'arme nucléaire. La fin de la guerre froide a

suspendu, définitivement il faut l'espérer, la phase des essais nucléaires ; réparer les conséquences coûtera beaucoup de temps et beaucoup d'argent.

La France a accédé au rang de grande puissance nucléaire plus tard que les autres, et a pu mener des essais limités qui lui ont permis de maîtriser non pas une arme de conquête mais une arme de dissuasion. Il paraît désormais difficile d'aller plus loin dans la connaissance des conséquences des essais nucléaires français.

Par contre, le champ de la connaissance mondiale des essais est immense à défricher. Ce rapport contribuera, nous l'espérons, à éclairer l'ensemble du dossier.

RECOMMANDATIONS DES RAPPORTEURS

Les recommandations visent aussi, pour l'essentiel, à obtenir la pérennisation d'orientations ou de mesures ponctuelles déjà engagées :

- le programme scientifique de surveillance des concentrations de radionucléides dans les formations carbonatées et dans les cavités-cheminées des essais nucléaires, dont l'AIEA a souligné l'intérêt sinon la nécessité, doit être poursuivi, complété *« par une certaine surveillance des niveaux de radionucléides dans la biosphère... ce qui pourra également être utile pour convaincre le public de la sûreté radiologique permanente des atolls »* pour reprendre les termes de l'AIEA.

- Concernant la situation géomécanique des atolls, le système de surveillance mis en place par la DIRCEN et le CEA, plus particulièrement pour la partie Nord-Est de la couronne de Mururoa, correspond tout à fait aux exigences de surveillance que l'on peut et doit avoir sur ce point ; une extension de cette surveillance au Nord-Est de Fangataufa serait à envisager, sauf à prouver scientifiquement qu'elle est devenue définitivement inutile.

- Concernant le statut des atolls, il apparaît que les prescriptions émises dans le rapport de 1997 sur les déchets nucléaires à haute activité (M. Christian Bataille rapporteur ; tome II - Déchets militaires) restent pleinement valables aujourd'hui et qu'il convient donc que ces sites d'essais soient considérés comme des sites de stockage de déchets nucléaires gérés selon les précautions qui s'imposent.

Le décret du 5 juillet 2001 a d'ailleurs, sur le plan du statut juridique proprement dit, clarifié et pérennisé la situation.

Il va de soi, mais il convient sans doute de le rappeler ici, que ces atolls, qui n'ont jamais été habités par une population locale, ne devront pas davantage l'être à l'avenir, la présence par contre d'un détachement chargé de la surveillance et de la logistique des travaux scientifiques est tout à fait indispensable, et ce avec les moyens nécessaires.

- Le suivi sanitaire de l'ensemble des populations de Polynésie française a été grandement amélioré à l'occasion de la surveillance que les essais nucléaires ont impliquée. Il y a lieu qu'il soit maintenu, voire amélioré, autant que faire se peut, et que notamment le registre des cancers soit pérennisé avec tous les moyens nécessaires, quel que soit le cadre juridique et institutionnel dans lequel il s'insère.

- Les études épidémiologiques menées depuis 1985 ont permis de clarifier certaines questions et celle en cours devrait répondre à quelques interrogations scientifiques qui restent. Les limites de tels travaux doivent toutefois être rappelées : la taille extrêmement réduite des effectifs en cause, l'incertitude constatée universellement sur les effets des faibles doses obligent à reconnaître l'impossibilité de recherches dont l'objet réel d'ailleurs n'aurait ni d'intérêt scientifique, ni d'intérêt médical.

- Il doit être rappelé que la communication du dossier médical personnel au médecin de tout ressortissant des armées, du Commissariat à l'énergie atomique ou des entreprises, affecté à un poste de travail en « zone contrôlée » (où le port de dosimètre est obligatoire) quel que soit le cadre et l'époque où il a servi, est une obligation légale qui s'impose à tout service de santé militaire ou civil. Un quelconque « secret –défense » ne saurait être invoqué pour s'opposer à cette obligation.

- Certaines techniques de recherches d'expositions anciennes pour des personnes ayant pu subir les doses de radioactivité intermédiaires pourraient se révéler utiles si ces personnes avaient échappé à tout suivi dosimétrique et toute recherche consécutive à un incident. Toutefois, la pleine validité de tels tests reste à établir. L'une de ces techniques pourrait sans doute être utile pour certains sites étrangers.

- On ne saurait envisager de transposer en France des mécanismes de prise en charge qui n'ont rien de commun avec la couverture sociale assurée par la législation française d'une part, et qui d'autre part s'adressent à des victimes d'accidents graves ou de contaminations avérées dont on ne trouve pas davantage trace à partir des sites d'essais français.

- En revanche, concernant la situation des personnes ayant été exposées à des radiations dans des conditions telles que se pose la question d'une pension d'invalidité, il apparaît nécessaire de mettre fin à la disparité constatée au détriment des personnes qui relèvent du code des pensions civiles et militaires par rapport à celles qui relèvent du régime général des maladies professionnelles (cas des agents du CEA et des entreprises extérieures). La présomption de causalité doit en effet être établie pour les premières comme elle l'est actuellement pour les secondes.

EXAMEN DU RAPPORT PAR L'OFFICE

L'Office s'est réuni le mercredi 23 janvier 2002 pour examiner le rapport de MM. Christian Bataille et Henri Revol.

Après la présentation par MM. Christian Bataille et Henri Revol des grandes lignes de leur rapport, plusieurs membres de l'Office sont intervenus.

Mme Michèle Rivasi, députée, s'est demandé s'il n'était pas gênant d'affirmer que les sites des essais français ne posaient pas problème. Des soldats au Sahara n'ont eu en effet aucun suivi et les dosimètres n'étaient pas donnés systématiquement. Par ailleurs, l'étude de l'AIEA soulève beaucoup de critiques et il est dommage qu'il n'ait pas été fait appel à la CRII-RAD pour apprécier ses résultats.

Mme Michèle Rivasi, députée, a estimé que l'on n'avait pas une connaissance exacte des personnes qui ont participé aux essais ou à leur organisation, au Sahara comme en Polynésie, et souligné que certaines personnes ne peuvent avoir communication de leur dossier médical car le « secret-défense » leur est opposé. Elle a souhaité que le rapport prévoie une recommandation sur ce dernier point.

Les **deux rapporteurs** ont indiqué qu'ils n'avaient pas eu connaissance de tels cas et que, lors des rencontres qu'il a eues à Tahiti, **M. Henri Revol, sénateur, rapporteur**, avait demandé sans succès que lui soient signalées de telles difficultés.

M. Serge Poignant, député, a abordé l'une des recommandations visant à mettre fin à la disparité des situations juridiques, les ressortissants du Code des pensions civiles et militaires ne bénéficiant pas de la présomption de causalité pour les affections radio-induites ; il a souligné le caractère politique de la décision qui devrait être prise en ce domaine.

M. Jean-Louis Lorrain, sénateur, a interrogé les rapporteurs sur les études qui auraient pu avoir été menées sur la descendance de personnes irradiées. Ceux-ci lui ont indiqué qu'il n'y en avait pas pour le moment à leur connaissance, à l'exception de celle portant sur les pêcheurs japonais irradiés lors du tir Bravo aux îles Marshall.

Le rapport a ensuite été **adopté**. Il en a été de même pour les recommandations, une recommandation supplémentaire ayant été ajoutée à l'initiative de **Mme Michèle Rivasi, députée**, pour rappeler que la communication du dossier médical au médecin de chaque ressortissant des armées était obligatoire et ne saurait être empêchée par un quelconque « secret défense ».

ANNEXES

➤ Annexe 1 :

Liste des personnes auditionnées

➤ Annexe 2 :

Composition des instances internationales chargées des expertises

➤ Annexe 3 :

Glossaire

➤ Annexe 4 :

Représentations figurées pour différents sites d'essais

Annexe 1 :
Liste des personnes auditionnées

En France :

M. Bruno Barillot, Directeur du Centre de documentation et de recherche sur la paix et les conflits

M. Michel Boileau, Général (C.R.), ancien directeur des Centres d'expérimentation nucléaires (DIRCEN)

M. le Médecin en chef Hubert de Carbonnières, chef du bureau radio-protection médicale au Service de protection radiologique des armées

M. Gérard Dellac, ancien des essais nucléaires au Sahara

M. Michel Dessoubrais, ancien des essais nucléaires au Sahara

Dr Anne Flüry-Hérard, conseiller santé auprès du Haut Commissaire à l'énergie atomique

M. Robert Galley, ancien Ministre, ingénieur ayant participé aux essais nucléaires français

M. Yves Le Baut, Capitaine de vaisseau honoraire, ancien directeur à la Direction des applications militaires (CEA)

Colonel Liedet, Cabinet militaire du Ministre de la Défense

M. Gérard Martin, Ingénieur (CEA), Conseiller scientifique au DSCEN

M. Henri Métivier, Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN), directeur de recherches, professeur à l'Institut des sciences et techniques nucléaires

M. Claude Musa, Ingénieur CEA, adjoint au chef du DSCEN

M. le Médecin en chef Claude Payen, chef du Département de suivi des centres d'expérimentations nucléaires (DSCEN)

Dr François Pic, Médecin-chef, Direction des applications militaires (CEA)

Capitaine de vaisseau Olivier Pillard, Cabinet militaire du Ministre de la Défense

M. Daniel Robeau, IPSN

M. Jean-François Sornein, CEA, responsable du bureau de liaison français pour l'étude du Comité consultatif international de l'AIEA et de la Commission géomécanique internationale ; actuellement directeur du Centre de Valduc (CEA)

M. le Médecin Général Jean-Yves Tréguier, Chef du service de protection radiologique des armées

M. Jean-Louis Valatx, Président de l'association des vétérans des essais nucléaires français

M. Florent de Vathaire, Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM, unité 521), Institut Gustave Roussy

M. Michel Verger, ancien des essais nucléaires au Sahara

M. Roland Weil, ancien des essais nucléaires au Sahara

En Polynésie française

Amiral Amaury Du Chené, commandant la flotte du Pacifique et les responsables médicaux militaires

M. Gaston Flosse, Président du Gouvernement territorial de Polynésie française et Mme Nicole Bouteau, Ministre territoriale du tourisme, de l'environnement et de la condition féminine

MM. Christian Massinon et Christian Jouve, respectivement Secrétaire général du territoire et Directeur du cabinet du Haut Commissaire de la République en Polynésie

M. Jacques Ihorai, Président de l'Eglise évangélique en Polynésie française, accompagné de Mme Céline Hoïore, de MM. Low Tihoti et Henri Chan ainsi que de Mme Thérèse Leharzez

Mgr Coppenrath, Evêque catholique de Tahiti

M. Boris Leontieff, Maire d'Arue et Conseiller territorial, accompagné de quatre autres membres du Conseil municipal d'Arue

M. Roland Oldham, Président de l'association Moruroa e tatou et MM. Tanemaruatoa Arakino, Marius Cham et Pierre Teuru, membres du bureau de l'association

M. Marama Anania et sept autres membres du « Comité provisoire d'anciens travailleurs du CEP » : MM. Maurice Barrière, Ernest Brothers, Joseph Lau, Benoît Tapi, Teano Teaka, Albert Tehoiri et Henri Toofa

En Australie :

➤ A Canberra

Ministère de l'industrie, des sciences et des ressources naturelles

M. Jeff Harris, Directeur général

M. Des Davy, Président du Comité consultatif technique pour la réhabilitation du site de Maralinga

Mme Caroline Parkins, Directrice de la gestion et du retraitement des déchets radioactifs

M. Philippe Na Champassak, Ministère des affaires étrangères et du commerce

➤ A Maralinga

M. Geoff Williams, Responsable de la section radioactivité environnementale à l'ARPANSA, Directeur de l'ancien laboratoire de la réhabilitation du site de Maralinga

M. Steve Sheppard, responsable du site de Maralinga

➤ A Adélaïde

Ministère des anciens combattants

M. Bill Maxwell, Directeur du service compensation et action sociale

M. Mark Johnson, Directeur du service compensation des handicaps

➤ A Melbourne

ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency)

M. Peter Burns, Directeur du Département environnement et protection sanitaire

M. Geoff Williams, (cf. supra)

M. Lyndsay Martin

➤ Ambassade de France

M. Philippe Guérin, Premier Conseiller, Chargé d'affaires a.i.

Mme Florence Mayol-Dupont, Premier Secrétaire

Annexe 2 :
Composition des instances internationales chargées
des expertises

COMITE CONSULTATIF INTERNATIONAL
Sur la situation radiologique des atolls
De Mururoa et Fangataufa

Participants à l'étude demandée à l'AIEA

Présidente

de Planque, E.G.
(ancien membre de la Commission de la
réglementation nucléaire des Etats-Unis),
consultante indépendante, Potomac, Maryland
(Etats-Unis)

Membres venant d'Etats Membres de l'AIEA

Beninson, D.J.
(ancien Président de la Commission internationale
de protection radiologique)
Autoridad Regulatoria Nuclear,
Buenos Aires (Argentine)

Clarke, R.
(Président de la Commission internationale
de protection radiologique)
Office national de protection radiologique,
Chilton, Oxfordshire
(Royaume-Uni)

Garnett, H.
Organisation australienne pour la science
et la technologie nucléaires,
Lucas Heights, Nouvelle-Galles du Sud
(Australie)

Holm, G.E.G.
Département de physique des rayonnements,
Hôpital universitaire de Lund
(Suède)

Karyono, H.S.
Centre pour la valorisation des minéraux nucléaires,
Agence nationale de l'énergie atomique,
Djakarta (Indonésie)

Kaul, A.
Bundesamt für Strahlenschutz,
Salzgitter (Allemagne)

Matushchenko, A.
Commission de protection radiologique,
Moscou (Fédération de Russie)

Numakunai, T.
Institut de mesure des rayonnements,
Tokai (Japon)

Poletti, A.
Département de physique,
Université d'Auckland
(Nouvelle-Zélande)

*Membres représentant ex officia des organisations
intergouvernementales*

Bennett, B.
Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude
des effets des rayonnements ionisants,
Vienne

Fraser, G.
Direction générale XI/C/1,
Commission européenne,
Luxembourg

Fuavao, V.A.
(Forum du Pacifique Sud)
Programme régional pour l'environnement
du Pacifique Sud,
Apia (Samoa)
(actuellement au Bureau du représentant sous-
régional de la FAO pour le Pacifique, Apia)

Kreisel, W.
Santé et environnement,
Organisation mondiale de la santé,
Genève

GROUPE D'ETUDE A

(Evaluation de la situation radiologique actuelle)

Président

McEwan, A.
Laboratoire national des rayonnements,
Christchurch (Nouvelle-Zélande)

Membres

Aarkrog, A.
Laboratoire national Risø,
Roskilde (Danemark)

Fujimoto, K.
Institut national des sciences radiologiques,
Chiba (Japon)

Gangaiya, P.
Université du Pacifique Sud,
Suva (Fidji)

Lokan, K.
Laboratoire australien des rayonnements,
Melbourne, Victoria
(Australie)

Robison, W.L.
Laboratoire national Lawrence de Livermore,
Californie (Etats-Unis)

Schönhofer, F.
(Autriche)
Président du Groupe de travail du milieu terrestre

Woodhead, D.
(Royaume-Uni)
Président du Groupe de travail du milieu aquatique

Observateur

Janssens, A.
Direction générale XI/C/1,
Commission européenne,
Luxembourg

GROUPE DE TRAVAIL DU MILIEU TERRESTRE
(Matières radioactives dans le milieu terrestre)

Président

Schönhofer, F.
Institut fédéral de contrôle et de recherche
pour les denrées alimentaires,
Vienne (Autriche)

**Participants à la campagne d'échantillonnage et de
surveillance du milieu terrestre**

Experts

Colgan, T.
Institute del Medio Ambiente,
Centro de Investigaciones Energéticas,
Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT),
Madrid (Espagne)
(actuellement à l'Institut irlandais de radioprotection,
Dublin (Irlande))

Cooper, M.
Laboratoire australien des rayonnements,
Melbourne, Victoria
(Australie)

Green, N.
Office national de protection radiologique,
Chilton, Oxfordshire
(Royaume-Uni)

Romero, M.L.
Instituto del Medio Ambiente,
Centro de Investigaciones Energéticas,
Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)
Madrid (Espagne)

Schönhofer, F.
Institut fédéral de contrôle et de recherche
pour les denrées alimentaires,
Vienne (Autriche)

Simon, S.
(ancien consultant auprès du Gouvernement de la
République des Iles Marshall)
Consultant privé
Reno, Nevada
(Etats-Unis)

Fonctionnaires de l'AIEA

Danesi, P.
Maillard, D.
Makarewicz, E.
Ouvrard, R.
Valkovic, V.
Zeiller, E.

Laboratoires

Agence norvégienne de radioprotection,
Østerås (Norvège)

Centro de Isótopos,
La Havane (Cuba)

Groupe de radiochimie,
Laboratoire central vétérinaire,
Addlestone, Surrey
(Royaume-Uni)

Institut de radiobiologie,
Minsk (Belarus)

Institut fédéral de contrôle et de recherche
pour les denrées alimentaires,
Vienne (Autriche)

Institut de chimie inorganique,
Université de Vienne
(Autriche)

Institut Jozef Stefan,
Ljubljana (Slovénie)

Instituto del Medio Ambiente,
Centro de Investigaciones Energéticas,
Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT),
Madrid (Espagne)

Laboratoires de l'Agence,
Agence internationale de l'énergie atomique,
Seibersdorf

Laboratoire de mesures environnementales,
Département de l'énergie des Etats-Unis, New
York, N.Y. (Etats-Unis)

Office national de protection radiologique,
Chilton, Oxfordshire
(Royaume-Uni)

Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
Brunswick (Allemagne)

GROUPE DE TRAVAIL DU MILIEU AQUATIQUE
(Matières radioactives dans le milieu aquatique)

Président

Woodhead, D.
Centre pour l'environnement, la pêche et les sciences
aquacoles,
Lowestoft, Suffolk,
(Royaume-Uni)

*Participants à la campagne d'échantillonnage et
de surveillance du milieu aquatique*

Experts

Blowers, P.
Centre pour l'environnement, la pêche et les sciences
aquacoles,
Lowestoft, Suffolk
(Royaume-Uni)

Dahlgaard, H. Laboratoire
national Risø, Roskilde
(Danemark)

Hamilton, T
Laboratoire national Lawrence de Livermore
Californie
(Etats-Unis)

Szymczak, R.
Groupe d'océanographie radiochimique.
Organisation australienne pour la science
et la technologie nucléaires,
Lucas Heights, Nouvelle-Galles du Sud
(Australie)

Woodhead, D.
Centre pour l'environnement, la pêche et les sciences
aquacoles,
Lowestoft, Suffolk
(Royaume-Uni)

Fonctionnaires de l'AIEA

Ballestra, S.
Huynh-Ngoc, L.
Osvath, I.
Povinec, P.

Laboratoires

Centre fédéral de recherche sur la pêche,
Hambourg (Allemagne)

Centre pour l'environnement, la pêche et les sciences
aquacoles,
Lowestoft, Suffolk
(Royaume-Uni)

Institut des sciences géologiques et nucléaires.
Lower Hutt (Nouvelle-Zélande)

Laboratoire AIEA de l'environnement marin.
Agence internationale de l'énergie atomique.
Monaco

Laboratoire australien des rayonnements,
Melbourne, Victoria
(Australie)

Laboratoire d'hydrologie isotopique. Agence
internationale de l'énergie atomique,
Vienne

Laboratoire national des rayonnements,
Christchurch (Nouvelle-Zélande)

Laboratoire national Lawrence de Livermore.
Californie (Etats-Unis)

Laboratoire national Risø.
Roskilde (Danemark)

Organisation australienne pour la science
et la technologie nucléaires.
Lucas Heights, Nouvelle-Galles du Sud
(Australie)

GROUPE D'ETUDE B

(Evaluation de la situation radiologique potentielle à
long terme)

Président

Levins, D.M.
Organisation australienne pour la science
et la technologie nucléaires. Lucas
Heights, Nouvelle-Galles du Sud
(Australie)

Membres

Aoki, K.
Bureau de Kamaishi,
Projet relatif à la gestion des déchets radioactifs.
Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation
Iwate (Japon)

Beninson, D.J.
(remplaçant E. D'Amato)
Autoridad Regulatoria Nuclear,
Buenos Aires (Argentine)

Cooper, J.
Office national de protection radiologique,
Chilton. Oxfordshire
(Royaume-Uni)

De Geer, L.E.

(Suède)

Président du Groupe de travail 3

Fairhurst, C. (Etats-Unis)

Président du Groupe de travail 4

Jones, R.

Département de l'énergie des Etats-Unis,

Germantown, Maryland

(Etats-Unis)

Kuersten, M.

(anciennement) Bundesanstalt für Geowissenschaften

und Rohstoffe,

Hanovre (Allemagne)

Mittelstaedt, E.

(Allemagne)

Président du Groupe de travail 5

Smith, D.

Laboratoire national Lawrence de Livermore,

Californie

(Etats-Unis)

Observateur

Girardi, F.

Centre commun de recherche,

Commission européenne

Ispira (Italie)

GROUPE DE TRAVAIL 3

(Terme source)

Président

De Geer, L.-E.

Etablissement de recherche pour la défense nationale.

Stockholm (Suède)

(actuellement à la Commission préparatoire pour

l'Organisation du Traité d'interdiction complète

des essais nucléaires. Vienne)

Membres

Beck, H.

Laboratoire de mesures environnementales,

Département de l'énergie des Etats-Unis

New York, N.Y. (Etats-Unis)

Comley, C.

AWE Blacknest

Brimpton, Berkshire

(Royaume-Uni)

Dubasov, Y.V.

Institut du radium V.G. Khlopin,

Saint-Petersbourg (Fédération de Russie)

GROUPE DE TRAVAIL 4

(Transport des radionucléides dans la géosphère)

Président

Fairhurst, C.

Université du Minnesota,

Minneapolis, Minnesota

(Etats-Unis)

Membres

de Marsily, G.

Université de Paris,

Paris (France)

Hadermann, J.

Institut Paul Scherrer,

Villigen (Suisse)

Nitsche, H.

Forschungszentrum Rossendorf e.V.,

Dresde (Allemagne)

Sastratenaya, A.S.

Agence nationale de l'énergie atomique,

Djakarta (Indonésie)

Townley, L.

Organisation de la recherche scientifique et industrielle

du Commonwealth, Perth,

Australie-Occidentale

(Australie)

Participants à la campagne de l'échantillonnage des eaux souterraines

Expert

Smith, D.

Laboratoire national Lawrence de Livermore,

Californie (Etats-Unis)

Fonctionnaires de l'AIEA

Mulsow, S.

Warnecke, E.

Laboratoires

Organisation australienne pour la science

et la technologie nucléaires Lucas

Heights, Nouvelle-Galles du Sud

(Australie)

Laboratoire AIEA de l'environnement marin.

Agence internationale de l'énergie atomique,

Monaco

GROUPE DE TRAVAIL 5 (Modélisation marine)

Président

Mittelstaedt, E.
Agence fédérale maritime et hydrographique.
Hambourg (Allemagne)

Membres

Deleersnijder, E.
Université catholique de Louvain.
Louvain (Belgique)

Scott, M.
Université de Glasgow,
Glasgow (Royaume-Uni)

Tomczak, M.
Institut Flinders des sciences atmosphériques
et marines,
Adélaïde, Australie-Méridionale
(Australie)

Yoon, J.-H.
(République de Corée),
Institut de recherche pour la mécanique appliquée,
Université Kyushu,
Fukuoka (Japon)

Membres cooptés

Osvath, I.
Laboratoire AIEA de l'environnement marin,
Agence internationale de l'énergie atomique,
Monaco

Povinec, P.
Laboratoire AIEA de l'environnement marin.
Agence internationale de l'énergie atomique,
Monaco

Rajar, R.
Université de Ljubljana,
Ljubljana (Slovénie)

Togawa, O.
Laboratoire AIEA de l'environnement marin,
Agence internationale de l'énergie atomique.
Monaco

COMMISSION GEOMECHANIQUE INTERNATIONALE

Membres

- M. Charles Fairhurst (Etats-Unis), Président
- M. Edwin T. Brown (Australie)
- M. Emmanuel Detournay (Belgique, Etats-Unis)
- M. Ghislain de Marsily (France)
- M. Victor Nikolaevsky (Russie)
- M. J.R. Anthony Pearson (Grande-Bretagne)
- M. Lloyd Townley (Australie)

Annexe 3 : Glossaire

RAPPEL DE PHYSIQUE NUCLEAIRE ET DE RADIOPROTECTION

La structure de la matière

Les particules les plus élémentaires connues sont les quarks. Ces particules composent les nucléons qui eux-mêmes forment les noyaux des atomes. Il y a deux types de nucléons : les protons et les neutrons. Les protons ont une charge électrique positive et les neutrons, dont la masse à l'état libre est de un pour mille plus grande que celle du proton, ont une charge électrique nulle. Un élément chimique peut avoir plusieurs isotopes, ils ont le même numéro atomique et diffèrent par leur nombre de masse, c'est-à-dire la somme des neutrons et des protons qui composent le noyau. Par exemple, l'uranium est l'élément qui a le numéro atomique 92. Les isotopes de l'uranium diffèrent par leur nombre de masse : 238, 235, 236, 234, etc.

La radioactivité

Certains isotopes sont instables, ce sont des radionucléides. Ils se transforment spontanément, en émettant des rayonnements ionisants et en donnant un élément fils qui peut être soit stable, soit lui-même radioactif. Lorsque tous les isotopes d'un élément sont radioactifs, on l'appelle radioélément.

Un ensemble de radionucléides est caractérisé par le nombre de noyaux qui se transforment en 1 seconde. L'unité employée est le becquerel (Bq), elle correspond à une transformation par seconde. En d'autres termes, le becquerel est l'intensité d'une source radioactive dont, chaque seconde, un des radioéléments la composant se désintègre. Le curie, ancienne unité caractérisant la radioactivité encore largement usitée, est l'intensité d'une source radioactive dont, chaque seconde, 37 milliards de radioéléments la composant se désintègrent.

La demi-vie ou période radioactive est le temps nécessaire pour que la moitié des atomes radioactifs présents dans un ensemble - une source - se désintègrent.

Les radionucléides sont caractérisés par la nature et l'énergie des rayonnements qu'ils émettent. Ces rayonnements sont dits « ionisants » parce que leur énergie est suffisante pour arracher un électron au cortège électronique des noyaux. Les rayonnements ionisants sont les rayonnements X, γ , α , β et les neutrons. Parmi ceux-ci, les rayonnements α , β et les neutrons sont des particules. La particule α est un noyau d'hélium et la particule β est un électron ou un positron.

Interaction des rayonnements avec les tissus vivants

Le corps humain est constitué, approximativement, de 10^{28} atomes, 60 000 milliards de cellules chacune d'entre elles contenant environ 100 000 milliards d'électrons. Lorsqu'une particule traverse les tissus, elle provoque des lésions aux cellules en interagissant avec les électrons des cellules et en cédant de l'énergie au cours de l'interaction. Les capacités des rayonnements à affecter les cellules varient avec la nature et l'énergie de ces rayonnements. Ainsi, des particules lourdes et lentes comme les particules α , mais dont le parcours est très court, provoquent des lésions plus importantes que les particules β plus légères mais dont le parcours est plus long (quelques millimètres).

La dose absorbée

L'énergie communiquée par le rayonnement à un kilogramme de matière est appelée la dose absorbée. Cette énergie est exprimée en joule par kilogramme de matière. L'unité de dose absorbée est le gray (Gy). Rappelons que d'autres unités sont encore rencontrées, le rad qui est égal à un centième de gray, et le röntgen qui est approximativement égal au rad. Le röntgen quantifiait la dose reçue à un mètre d'une source de 1 curie de radium.

L'énergie cédée à la matière par un rayonnement est toujours faible car on se souviendra que l'augmentation de température d'un gramme d'eau recevant une énergie d'un joule n'augmente que de 0,24 °C. Un gray délivré à un kilogramme de matière n'induit une augmentation de température que de 2 dix millièmes de degré. Ce n'est donc pas l'énergie cédée par le rayonnement à la cellule qui crée un dommage à la cellule mais les lésions moléculaires.

La dose équivalente

L'énergie cédée aux tissus est donc seulement un indicateur des dommages cellulaires. Nous avons vu qu'à énergie cédée égale, les dommages à la cellule dépendaient de la nature de la particule. C'est pour cela que pour quantifier le dommage aux tissus, la dose absorbée est multipliée par un coefficient d'efficacité biologique dépendant de la nature de la particule : 1 pour les rayonnements X et γ , 20 pour les particules α et entre 5 et 20 pour les neutrons. Cette nouvelle quantité est dénommée « dose équivalente » et a pour unité le sievert (Sv). Notons qu'une unité plus ancienne appelée le rem est encore utilisée, elle est égale à un centième de sievert.

La dose effective

Tous les tissus de l'organisme et donc tous les organes ne sont pas égaux devant les rayonnements. Ainsi, les tissus des organes reproducteurs, la moelle osseuse sont plus sensibles que les tissus musculaires. Pour quantifier les dommages à l'organisme entier d'un individu qui a été exposé à un ou plusieurs rayonnements, on a défini la notion de dose effective qui est la somme des doses équivalentes à chaque organe, chaque dose étant munie d'un facteur de pondération reflétant la radio-sensibilité de l'organe. Cette dose effective est exprimée en sievert.

Dans les calculs de la dose effective, les organes reproducteurs ont un coefficient de pondération de 0,2, la moelle osseuse, les intestins, l'estomac, les poumons ont un coefficient de pondération de 0,12. Les autres organes ont un coefficient de pondération de 0,05, enfin les organes considérés comme les moins sensibles sont la peau et la surface des os.

Quelques références dosimétriques

Deux et demi millièmes de sievert, 2,5 millisieverts ou mSv, est la dose effective qu'un individu reçoit chaque année sans bouger de chez lui. Cette dose est due à la radioactivité naturelle de la terre et de l'atmosphère. Cette valeur est une moyenne en France, mais elle est très variable à la surface de la Terre car elle dépend de la latitude et de la longitude, de l'altitude. Plus un individu vit près des pôles, plus un individu vit en altitude, plus le sol contient des radioéléments d'origine naturelle comme le potassium 40, l'uranium, le thorium, le radon, etc., plus une dose importante lui est délivrée. Cette dose peut atteindre dans certaines régions plusieurs dizaines de millisieverts.

La dose absorbée mesurée à la surface du corps, à la suite d'une radiographie normale, varie de 3 à 10 mSv. Compte tenu de la répartition dans les différents organes, la dose efficace d'une radiographie est de 0,15 mSv pour une radio pulmonaire, de 1 mSv pour une mammographie et de 5 mSv pour un scanner simple. Dans les opérations de radiothérapies qui ont pour objet de détruire les tissus cancéreux, des doses de l'ordre de 100 Sv peuvent être délivrées.

Risques déterministes et risques stochastiques

On a montré depuis longtemps que si l'on expose des humains ou des animaux à de fortes doses de rayonnements, on induit différents effets appelés déterministes ou stochastiques. Les effets déterministes sont des effets qui pour certaines valeurs élevées de dose sont certains. Les effets stochastiques sont des effets qui, pour de faibles valeurs de dose, sont aléatoires, c'est-à-dire que si un grand nombre de personnes sont exposées, une survenue d'excès de cancers ou de mutations génétiques peut apparaître dans la population exposée.

La part de population touchée dépend de la valeur de la dose. Cette part est appelée coefficient de risque et est en général exprimée en nombre de cancers en excès par sievert délivrée en moyenne à chaque individu de la population. La Commission Internationale de Protection Radiologique a ainsi défini un coefficient de risque égale à 0,05 cancer mortel en excès par sievert reçu. Cela signifie, que pour 100 personnes ayant reçu une dose de 1 Sv, 5 développeraient selon cette théorie résultant des observations effectuées sur la population survivantes aux expositions d'Hiroshima et de Nagasaki, un cancer mortel dû aux rayonnements, en excès aux 20 à 25 cancers mortels normalement observés dans une telle population.

Source : D. Robeau - IPSN

La terminologie étant parfois délicate à fixer dans ce domaine, notamment en raison de problèmes de traductions, il y a lieu de noter que «dose efficace» et «dose effective» sont rigoureusement synonymes ; il en est de même pour «équivalent de dose» et «dose équivalente».

Tableau résumé des unités utilisées pour la mesure de la radioactivité

Grandeurs	Unités	Equivalences	Définitions
Activité	Becquerel (Bq)		Mesure du nombre de désintégrations par seconde au sein d'une matière radioactive.
	Curie (Ci)	1 Ci = 37 milliards de Bq	
Dose absorbée	Gray (Gy)	1 Gy = 100 rd	Mesure de l'énergie reçue par la matière irradiée par unité de masse.
	Rad (rd)	1 rd = 1/100 Gy	
Equivalent de dose	Sievert (Sv)	1 Sv = 100 rems	Mesure du dégât biologique sur les tissus vivants irradiés.
	Rem	1 rem = 1/100 Sv	
Débit de dose absorbée	Gray par heure (Gy/h ou $Gy \times h^{-1}$)	1 Gy/h = 100 rd/h	Quantité d'énergie reçue par la matière irradiée par unité de masse et par unité de temps.
	Rad par heure (rd/h ou $rd \times h^{-1}$)	1 rd/h = 1/100 Gy/h	
Débit d'équivalent de dose	Sievert par heure (Sv/h ou $Sv \times h^{-1}$)	1 Sv/h = 100 rems/h	Dégât biologique subi par un tissu vivant irradié par unité de temps.
	Rem par heure (rem/h ou $rem \times h^{-1}$)	1 rem/h = 1/100 Sv/h	

Annexe 4 :
Représentations figurées pour différents sites
d'essais

Représentations figurées pour différents sites d'essais

Site d'essais du Sahara

Figure 1 : Sahara : carte des isodoses pour les expérimentations aériennes

Site d'essais de Polynésie

Figure 2 : Emplacement et énergie des essais souterrains à Mururoa

Figure 3 : Diagramme schématique des sept catégories d'essais et d'expériences utilisées pour la modélisation du transport des radionucléides dans la géosphère dans les atolls

Figure 4 : Illustration de la circulation de l'eau à travers la roche sous l'atoll de Mururoa : circulation naturelle et circulation induite par un essai nucléaire

Site d'essais du Nevada

Figure 5 : Estimation des doses d'iode 131 à la thyroïde pour les personnes nées le 1.1.1945 (consommation moyenne de lait)

Figure 6 : Estimation des doses d'iode 131 à la thyroïde pour les personnes nées le 1.1.1945 (consommation élevée de lait)

Figure 7 : Estimation des doses d'iode 131 à la thyroïde pour les personnes nées le 1.1.1945 (consommation de lait de la « vache dans le pré »)

Figure 8 : Estimation des doses d'iode 131 à la thyroïde pour les personnes nées le 1.1.1945 (absence de consommation de lait)

Figure 9 : Estimation des doses d'iode 131 à la thyroïde pour les personnes nées le 1.1.1952 (consommation moyenne de lait)

Figure 10 : Estimation des doses d'iode 131 à la thyroïde pour les personnes nées le 1.1.1952 (consommation élevée de lait)

Figure 11 : Estimation des doses d'iode 131 à la thyroïde pour les personnes nées le 1.1.1952 (consommation de lait de « vache dans le pré »)

Figure 12 : Estimation des doses d'iode 131 à la thyroïde pour les personnes nées le 1.1.1952 (absence de consommation de lait)

Figure 13 : Estimation des doses d'iode 131 à la thyroïde pour les personnes nées le 1.1.1945 résultant de la série Plumbbob, mai-octobre 1957

Site d'essais de Semipalatinsk

Figure 14 : Carte des isodoses, en mSv, pour chacun des essais aériens ayant engagé les plus fortes doses (1949, 1951, 1953, 1955 et 1956)