

**Les retombées en France des essais
atmosphériques d'armes nucléaires
Production, fractionnement, dispersion
atmosphérique et dépôt des produits de
fission**

Philippe RENAUD, Didier LOUVAT & Françoise VRAY

**Service d'Étude et de Surveillance de la Radioactivité dans
l'Environnement**

Rapport DEI/SESURE n° 03-03

11/2003

IRSN INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE
 DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'INTERVENTION
 SERVICE D'ETUDE ET DE SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT

BP 35, 78116 LE VESINET CEDEX, France - Télécopie : 01.30.15.37.78 - Téléphone : 01.30.15.52.42




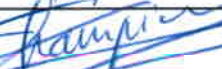
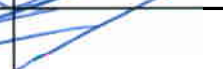
Demandeur	IRSN/PROG
Référence de la demande	Fiche programme RADEMER + RADETER 2002
Numéro de la fiche programme	

**Les retombées en France des essais atmosphériques
d'armes nucléaires**

**Production, fractionnement, dispersion atmosphérique et dépôt des produits
de fission**

Laboratoire d'Etudes Radioécologiques du milieu Continental et Marin

Rapport DEI/SESURE n° 03-03

	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur *	Chef du SESURE	Directeur de la DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	Ph. RENAUD	Y. BAUDIN-JAULENT	N. LEMAITRE	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	14.11.2003	14.11.2003	19/11/03	23/11/03	
Signatures					

* rapport sous assurance de la qualité

RÉSUMÉ

Les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires ont constitué le seul apport massif de radionucléides à l'échelle planétaire dont la rémanence reste encore aujourd'hui la principale origine de la radioactivité artificielle présente dans l'environnement français.

Les mesures effectuées depuis 1961 par le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI), devenu depuis l'Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants (OPRI) puis l'IRSN, témoignent des retombées de ces tirs et de leur puissance.

A partir de ces mesures et de modèles radioécologiques, les dépôts des produits de fission de 1961 à 1983 ont été reconstitués. Cette reconstitution constitue une base solide pour les évaluations dosimétriques contemporaines de ces retombées.

Outre ^{137}Cs et ^{90}Sr pour lesquels de nombreuses mesures ont été effectuées dans différents pays, les mesures effectuées en France ont porté également sur des radionucléides beaucoup moins analysés mais tout aussi importants en terme de radioprotection, comme ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{140}Ba , ^{144}Ce , et ^{141}Ce , dont les dépôts ont été estimés et validés par les activités mesurées dans l'herbe à cette époque.

La comparaison de leur comportement dans les processus de transfert atmosphérique et de dépôt ont permis de dégager des paramètres utilisables pour reconstituer les dépôts d'autres produits de fission ou d'activation qui ont fait l'objet de très peu, voire d'aucune mesure : ^{91}Y , ^{125}Sb et les isotopes du plutonium.

Des éléments qui permettront, par recoupement avec des données d'autres natures, une reconstitution des dépôts de ^{131}I et donc des doses à la thyroïde contemporaines des essais, sont également fournis.

La caractérisation des dépôts pluvieux et l'étude de la relation entre les dépôts de ^{137}Cs et les précipitations moyennes annuelles, permettent de disposer d'une carte de France des dépôts cumulés de ^{137}Cs dus aux essais. Par ailleurs, l'étude de la relation établie entre l'activité de l'air et celle de l'eau de pluie, permet de déduire des cartes analogues pour tous les radionucléides étudiés, excepté l'iode pour lequel on peut supposer un comportement particulier vis à vis des processus de dépôt sec et humide. Ces cartes des dépôts cumulés permettront d'évaluer plus précisément les doses reçues par les personnes résidents dans les zones de France métropolitaines les plus touchées par les retombées des tests nucléaires atmosphériques.

MOTS-CLÉS :

Armes Nucléaires, produits de fission, dépôts, France

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	4
2. GÉNÉRALITÉS SUR LES ESSAIS D'ARMES NUCLÉAIRES ET LEURS RETOMBÉES	5
2.1. Chronologie, puissance des essais et sites de tirs	5
2.2. Production d'isotopes radioactifs	5
2.3. Injection et dispersion dans l'atmosphère	8
3. LES MESURES D'ACTIVITÉ DES PRODUITS DE FISSION DANS L'AIR ET L'EAU DE PLUIE	11
4. CARACTÉRISATION DES DÉPÔTS RADIOACTIFS	14
4.1. Évaluation des dépôts par l'UNSCEAR.....	14
4.2. Étude du rapport entre l'activité de l'eau de pluie et celle de l'air, lessivage.....	14
4.3. Reconstitution des dépôts.....	15
4.4. Comparaison avec les estimations de l'UNSCEAR,.....	17
4.5. Cas des radionucléides de période courte : ^{103}Ru , ^{131}I , ^{140}Ba et ^{141}Ce	18
4.6. Influence des précipitations moyennes annuelles sur l'importance des dépôts ..	19
5. ACTIVITÉS DES HERBAGES ET VALIDATION DES DÉPÔTS	22
5.1. Relation entre les activités des herbages et les dépôts mensuels correspondants.....	22
5.2. Détermination des valeurs des paramètres radioécologiques	23
6. CONCLUSION.....	25
7. BIBLIOGRAPHIE.....	26

ANNEXE 1 : DÉTAIL DES TESTS

ANNEXE 2 : LES FICHES

1. INTRODUCTION

Les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires ont constitué le seul apport massif de radionucléides à l'échelle planétaire dont la rémanence reste encore aujourd'hui la principale origine de la radioactivité artificielle présente dans l'environnement français.

Les mesures effectuées depuis 1961 par le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI), devenu l'Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants (OPRI) puis l'IRSN, témoignent des retombées de ces tirs et de leur puissance.

A partir de ces mesures et de modèles radioécologiques, les dépôts des produits de fission de 1961 à 1983, ainsi que l'évolution des activités dans les principales composantes de la chaîne alimentaire, laits, viandes, légumes, céréales et vin, produits en France durant cette période, ont été reconstitués.

Cette connaissance est indispensable si l'on souhaite interpréter les activités mesurées aujourd'hui et juger de l'impact d'événements comme l'accident de Tchernobyl ou l'accident d'Algésiras ou encore des rejets des installations nucléaires.

Ces longues séries de mesures de plusieurs produits de fission permettent de tester les modèles radioécologiques et d'étudier en milieu naturel certains mécanismes de transfert des radionucléides qui n'avaient jusque là été abordés que par l'expérimentation ou la modélisation.

Ce rapport est consacré à la caractérisation des produits de fission et à leur comportement depuis leur production jusqu'à leur dépôt en France métropolitaine.

Leurs activités dans les productions alimentaires ainsi que les doses résultantes feront l'objet de documents séparés. Il en sera de même des retombées des produits d'activation (^3H , ^{14}C notamment) et des retombées dans les Départements et Territoires d'outre-mer, notamment à La Réunion et en Polynésie.

2. GÉNÉRALITÉS SUR LES ESSAIS D'ARMES NUCLÉAIRES ET LEURS RETOMBÉES

2.1. Chronologie, puissance des essais et sites de tirs

Depuis 1945, cinq nations ont effectué plus de 504 essais aériens d'armes nucléaires : les Etats-Unis, l'URSS, le Royaume-Uni, la France et la Chine.

L'essentiel de la puissance, exprimée en Mégatonne-équivalent de TriNitroToluène, a été libéré de 1954 à 1958, et surtout en 1961 et 1962 (Figure 1). Entre ces deux périodes, un moratoire a été respecté par les USA, l'URSS et le Royaume-Uni du début de 1959 jusqu'à l'automne de 1961, période durant laquelle la France a effectué ses 4 premiers essais en Algérie (13 février 1960 au 25 avril 1961). Au cours de la seule année 1962, 118 essais représentant une puissance de 170 Mt ont été effectués par l'URSS et les USA. Les puissances des engins étaient extrêmement variables, de moins de 1 tonne jusqu'à l'explosion russe record de 50 Mt du 30 octobre 1961 en Nouvelle-Zembie. Le traité de non-prolifération des armes nucléaires, signé en août 1963 a marqué la fin des essais atmosphériques américains, russes et anglais. Les tirs atmosphériques français et chinois qui ont continué respectivement jusqu'en 1974 (14 septembre) et 1980 (16 octobre), ne représentent que 2,3% et 4,7% de la puissance totale estimée à 440 Mt. Les deux tiers de cette puissance totale, soit 289 Mt, ont été libérés en 25 explosions russes et américaines supérieures à 4 Mt. L'inventaire de tous les essais recensés en 2002 et leur puissance est fourni dans l'annexe 1 (UNSCEAR, 2000).

A partir du début des années 60, les tirs sous-terrains ont progressivement remplacé les explosions aériennes. 1870 essais sous-terrains ont ainsi été effectués jusqu'en 1996. En 1998, deux nouveaux états, l'Inde et le Pakistan, ont effectué chacun 6 essais sous-terrains.

Les sites des tirs aériens étaient répartis sur l'ensemble du globe, bien que la plupart des explosions aient eu lieu dans l'hémisphère nord (Figure 2). Les explosions ont été effectuées à différentes altitudes, depuis la surface du sol ou sur des barges en mer, jusqu'en haute atmosphère (rocket), en passant par des tours de quelques mètres à plus de 100 m, des ballons situés à quelques centaines de mètres et des engins largués d'un avion.

2.2. Production d'isotopes radioactifs

Lors d'une explosion de fission nucléaire de 1kt, $1,5 \cdot 10^{23}$ noyaux lourds de ^{235}U ou ^{239}Pu fissionnent (se cassent) après avoir capturé un neutron, libérant une énergie totale de $4 \cdot 10^{12}$ Joules ($4 \cdot 10^{19}$ ergs). Chaque fission engendre deux produits de fission et en moyenne 2,5 à 3 neutrons. 56 radionucléides sont susceptibles d'être créés directement par cassure des noyaux lourds, les produits de fission primaires. Tous ont une masse atomique comprise entre 72 et 158 (Izrael, 2002). Lorsqu'un atome lourd fissionne, la probabilité qu'un produit de fission déterminé soit engendré s'appelle le rendement de fission. Les rendements de fission les plus élevés correspondent aux masses atomiques voisines de 95 (^{89}Br et ^{90}Br , ^{91}Kr à ^{97}Kr) et 140 (^{131}I à ^{137}I , ^{133}Xe à ^{144}Xe) (Figure 3).

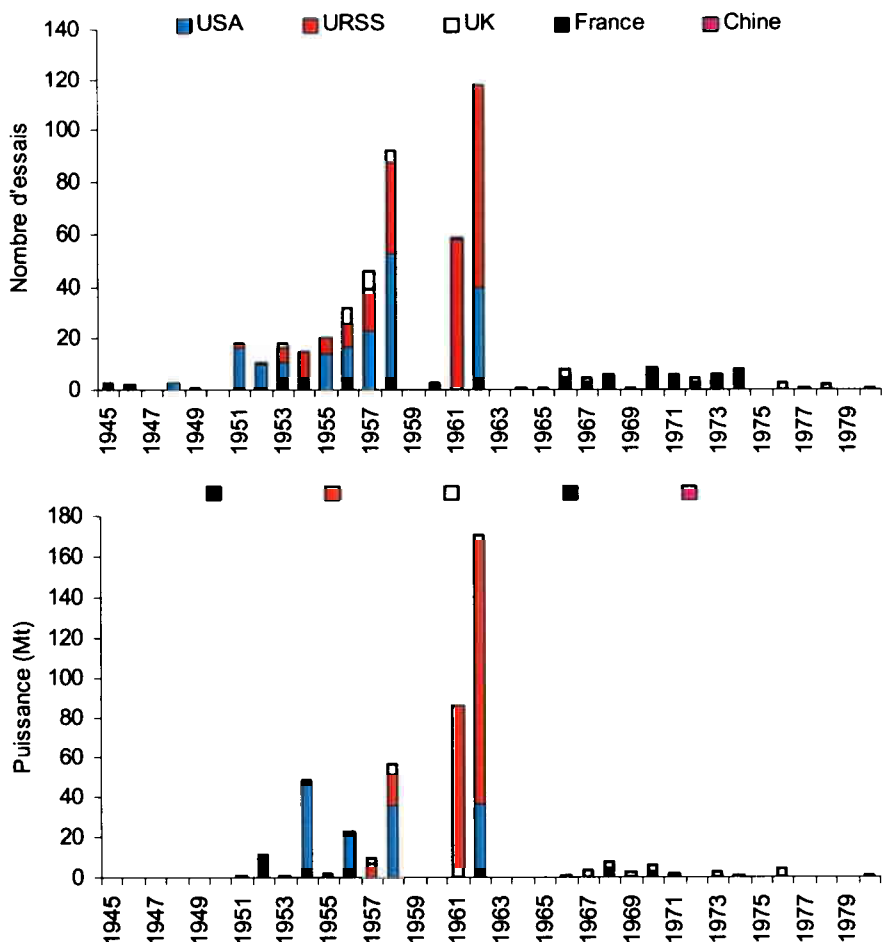


Figure 1 : Nombre d'essais atmosphériques et puissance libérée par année et par pays

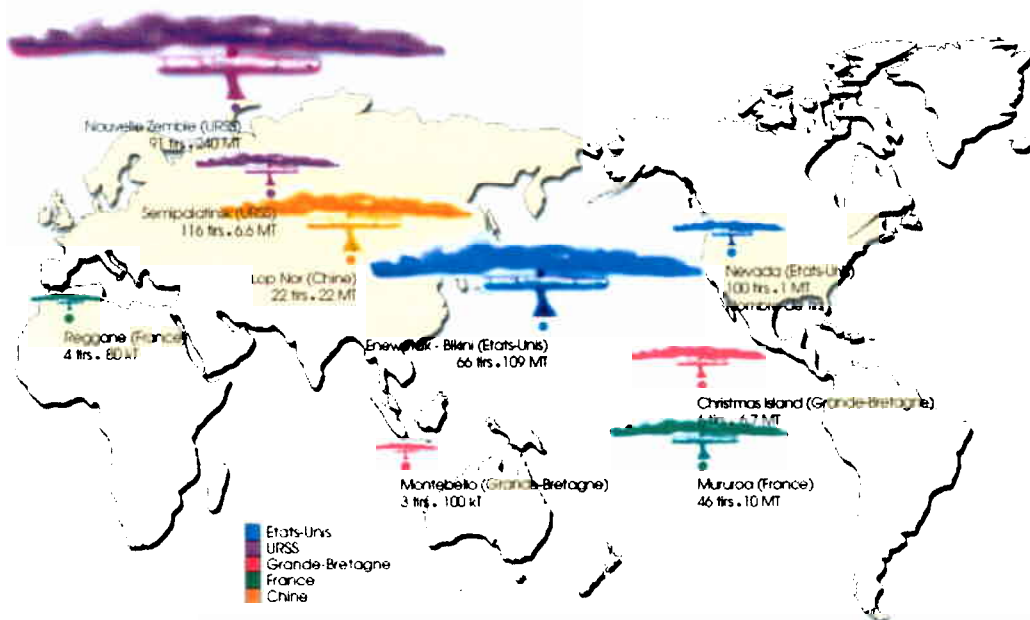


Figure 2 : Localisation des sites de tirs atmosphériques d'armes nucléaires. Les tailles des « champignons » sont proportionnelles aux puissances cumulées.

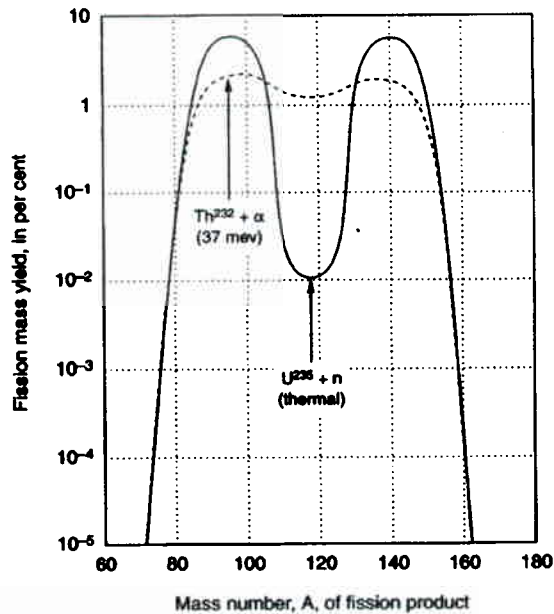


Figure 3 : Rendements de fission (%) d'un noyau de ^{235}U en fonction de la masse atomique des produits de fission (Meek et Rider, 1974)

En se désintégrant, ces radionucléides engendrent des produits de fission secondaires qui constituent l'essentiel des retombées des produits de fission provenant des essais atmosphérique d'armes nucléaires. Ainsi, ^{90}Kr est le produit de fission primaire précurseur du ^{90}Sr avec une désintégration intermédiaire donnant ^{90}Rb . De même, ^{137}I est le produit de fission primaire précurseur du ^{137}Cs après une désintégration intermédiaire donnant ^{137}Xe (Figure 4).

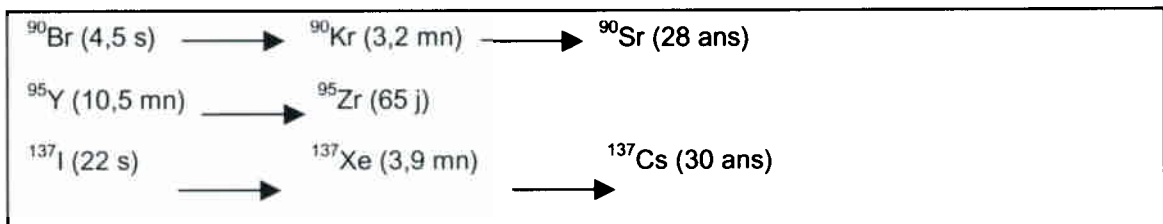


Figure 4 : Chaînes de désintégrations 90, 95 et 137 (Izrael, 2002)

Les rendements de fissions, les activités globales rejetées ainsi que les périodes radioactives des principaux produits de fissions des retombées sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 – Caractéristiques des radionucléides émis.

Radionucl.	Rdt.Fis. %	Rej.Glob. PBq	Période	Radionucl.	Rdt.Fis. %	Rej.Glob. PBq	Période
⁸⁹ Sr	3.17	117000	50.5 j	¹²⁵ Sb	0.4	741	2.76 a
⁹⁰ Sr	3.5	622	28.8 a	¹³¹ I	2.9	675000	8.02 j
⁹¹ Y	3.76	120000	58.5 j	¹³⁷ Cs	5.57	948	30.7 a
⁹⁵ Zr	5.07	148000	64.0 j	¹⁴⁰ Ba	5.18	759000	12.8 j
¹⁰³ Ru	5.2	247000	39.3 j	¹⁴¹ Ce	4.58	263000	32.5 j
¹⁰⁶ Ru	2.44	12200	373 j	¹⁴⁴ Ce	4.69	30700	284.9 j

Outre les produits de fission, d'autres radionucléides sont générés lors de l'explosion, par interaction entre des neutrons issus de la fission et la matière environnante (air, sol, roche, matériaux de structure de l'engin). Il s'agit de produits d'activation dont les principaux sont ³H et ¹⁴C. En raison de leur implication dans les cycles biogéochimiques de l'hydrogène et du carbone, ces radionucléides seront traités indépendamment des produits de fission.

2.3. Injection et dispersion dans l'atmosphère

Lors d'une explosion nucléaire, les produits de fission, les matières fissiles résiduelles et les matériaux de construction de l'engin sont portés à une température suffisamment élevée pour passer à l'état gazeux. Lorsque la boule de feu se dilate et s'élève par effet hydrostatique, les débris vaporisés se condensent par refroidissement et forment un aérosol de distribution granulométrique très large, de moins de 0,01 µm à plus de 10 µm. Au début de la dilatation de la boule de feu, quelques dizaines de secondes après l'explosion, il se forme des particules composées principalement d'oxyde de fer et d'aluminium et d'autres matériaux réfractaires de diamètre supérieur à 0,5 µm.

Les radionucléides dont les oxydes sont les plus réfractaires (point d'ébullition le plus élevé) tendent à être incorporés dans ces particules. C'est le cas par exemple du strontium primaire, de l'yttrium, du zirconium ou du cerium qui sont considérés comme réfractaires car leur condensation (ou celle de leurs oxydes) est achevée quand les particules se solidifient.

Lorsque le matériau réfractaire s'est séparé par condensation, le gaz restant, enrichi en radionucléides plus volatils et en radionucléides à précurseurs volatils se condense en particules de petites dimensions (<0,5µm). C'est le cas de Kr, Xe, I et Br, qui ne peuvent se condenser avant la solidification. Pour les éléments intermédiaires comme le césium ou le ruthénium, l'appartenance à l'un ou l'autre groupe dépend du déroulement de l'explosion.

Cette séparation des radionucléides entre particules d'aérosols de deux classes granulométriques différentes est désignée sous le terme de fractionnement.

De plus, lorsque l'explosion est près de la surface du sol, des quantités considérables de terre et de roches peuvent se mêler à la boule de feu. Cette masse de sol et de roche est évaluée à 5000 t par kt d'explosif, dont 200t fusionnent et jusqu'à 25t se vaporisent. Au moment du refroidissement, ces éléments tendent à constituer des particules de grandes tailles (jusqu'à quelques centaines de micromètres) sur lesquelles se fixent les radionucléides.

Comme la sédimentation par gravité est plus importante pour les grosses particules, elles tendent à retomber près du lieu de l'explosion. Ainsi, la majeure partie des produits de fission réfractaires et n'ayant pas de précurseurs volatils, fixés sur de grosses particules,

retombent localement dans un rayon de quelques dizaines à quelques centaines de km dans le vent autour du site de tir.

Les radionucléides volatils ou ayant des précurseurs volatils, fixés sur les plus fines particules ($< 1\mu\text{m}$) demeurent plus longtemps dans l'atmosphère et se dispersent dans une zone plus étendue. C'est le cas de ^{90}Sr (précurseur ^{90}Br et ^{90}Kr), de ^{137}Cs (précurseur ^{137}I et ^{137}Xe), de ^{140}Ba (^{140}I et ^{140}Xe) et de ^{95}Zr (^{95}Kr). Cependant, ce dernier radionucléide étant réfractaire et n'ayant qu'un seul précurseur volatil de période très courte, on estime à 50% l'activité fixée sur de grosses particules qui retombent localement au voisinage du site de tir.

Les retombées des produits de fissions fixées sur les particules sub-micrométriques sont de deux types : troposphériques ou stratosphériques (planétaires). Leur répartition dépend de la puissance de l'explosion, de l'altitude et de la latitude du site de tir.

La hauteur de la tropopause qui sépare la troposphère de la stratosphère varie en fonction de la latitude. Elle est plus haute à l'équateur qu'au pôle. Dans le modèle de circulation atmosphérique utilisé par l'UNSCEAR, l'atmosphère est divisée en deux régions : équatoriale entre 0° et 30° de latitude, et polaire entre 30° et 90° de latitude (Figure 5). Dans la région équatoriale, la basse stratosphère commence entre 17km et 24km d'altitude, et entre 9km et 17km dans la région polaire. La haute stratosphère s'étend ensuite jusqu'aux environs de 50km d'altitude. Par ailleurs, la hauteur atteinte par le nuage est de manière générale proportionnelle à la puissance de l'essai. Une explosion inférieure à 10kt donnera principalement des retombées troposphériques. Au-delà de 1Mt les retombées sont principalement stratosphériques. Seuls quelques essais d'altitude et de très forte puissance ont conduit à injecter des produits de fission au delà de la stratosphère (UNSCEAR 2000).

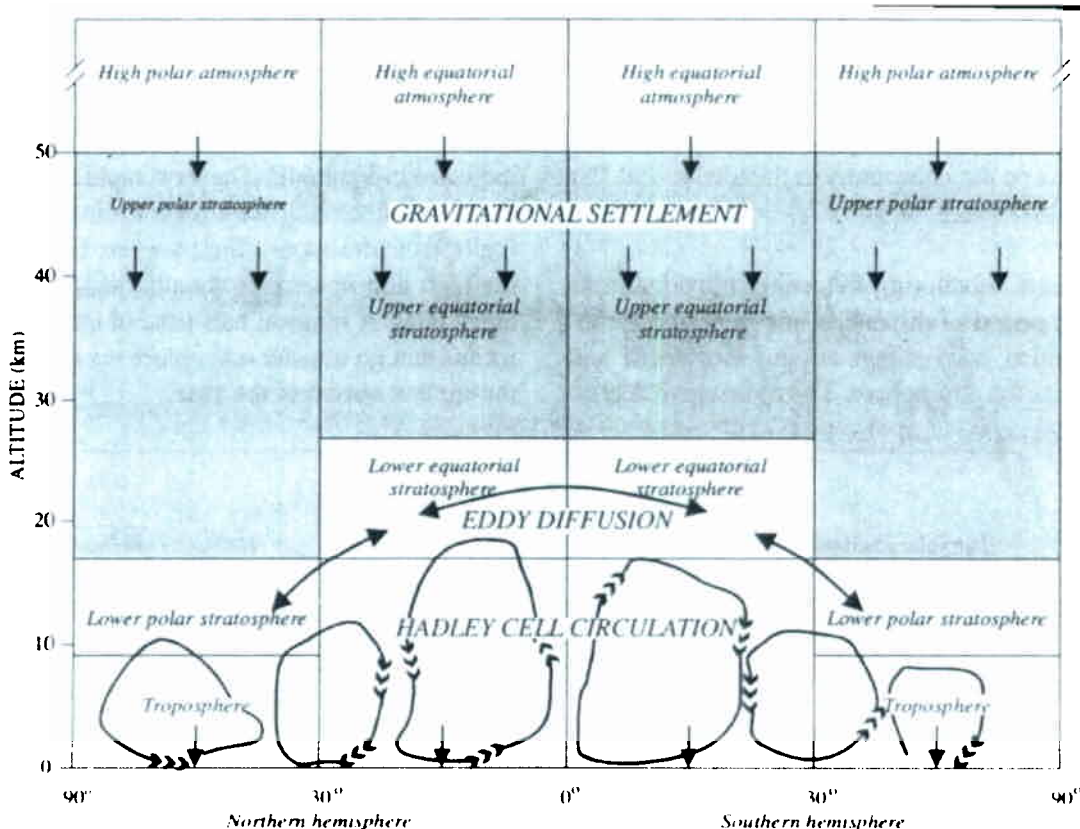


Figure 5 : modèle atmosphérique de l'UNSCEAR (UNSCEAR, 2000)

Les produits de fission injectés dans la troposphère vont y séjourner de quelques jours à quelques semaines avant de se déposer à la surface du sol. Durant ce délai, ils vont être transportés, sur des milliers de kilomètres par les vents dominants qui va les disperser autour de la latitude d'injection. La figure 6 présente l'exemple des retombées

troposphériques de l'essai chinois du 17 septembre 1977. Le site de tir de LopNor se trouve au voisinage du 40° de latitude, et donc à la latitude de la France. C'est pourquoi, entre le 28 et 29 septembre, après avoir fait le tour du globe centré sur cette latitude, le nuage de produits de fission est parvenu en France. Le site américain du Nevada et le site soviétique de Semipalatinsk se trouvent respectivement à 37° et 52° de latitude, également proches de la latitude de la France.

Les produits de fissions injectés dans la stratosphère vont redescendre par gravité durant une période de 2 à 12 mois dans les régions polaires et de 8 à 24 mois dans les régions équatoriales. Ce délai conduit à une bonne homogénéisation. Une fois descendus dans la troposphère ils vont suivre les mouvements généraux de l'air en s'incorporant dans les cellules de Hadley. Les sens de circulation de ces cellules va conduire à augmenter les retombées dans les régions tempérées et notamment entre 40° et 50° de latitude et à limiter les échanges entre les hémisphères (Tableau 2).

Compte tenu des temps de séjour dans l'atmosphère, les retombées troposphériques constituent l'essentiel des retombées pour les radionucléides de période courte comme ^{131}I ou ^{140}Ba . A l'inverse, la majeure partie des retombées des radionucléides de période plus longue comme ^{106}Ru , ^{137}Cs ou ^{90}Sr ont été stratosphériques.

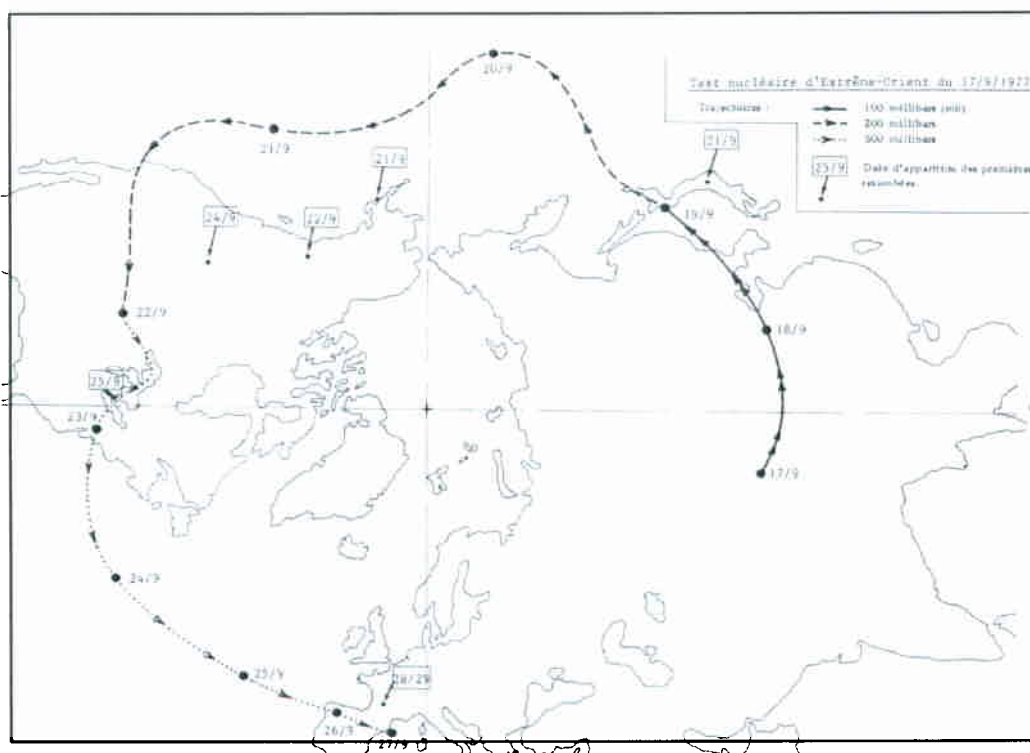


Figure 6 : Trajectoire du "nuage radioactif" des retombées troposphériques du tir chinois du 17 septembre 1977 (SCPRI, 1977).

Tableau 2 : Répartition latitudinale en % des retombées totales de ^{90}Sr

Bande de latitude Hémisphère Nord	% des retombées totales de ^{90}Sr	Bande de latitude Hémisphère Sud	% des retombées totales de ^{90}Sr
80 - 90	0,2	80 - 90	0,1
70 - 80	1	70 - 80	0,4
60 - 70	5	60 - 70	1
50 - 60	12	50 - 60	2
40 - 50	17	40 - 50	5
30 - 40	14	30 - 40	5
20 - 30	13	20 - 30	5
10 - 20	8	10 - 20	3
0 - 10	6	0 - 10	4
Total	76	Total	24

3. LES MESURES D'ACTIVITÉ DES PRODUITS DE FISSION DANS L'AIR ET L'EAU DE PLUIE

Depuis 1961 le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI), aujourd'hui intégré à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), a effectué des mesures de produits de fission dans différentes composantes de l'environnement et plus particulièrement de la chaîne alimentaire, sur plusieurs stations d'échantillonnage réparties sur l'ensemble du territoire français (Figure 7).

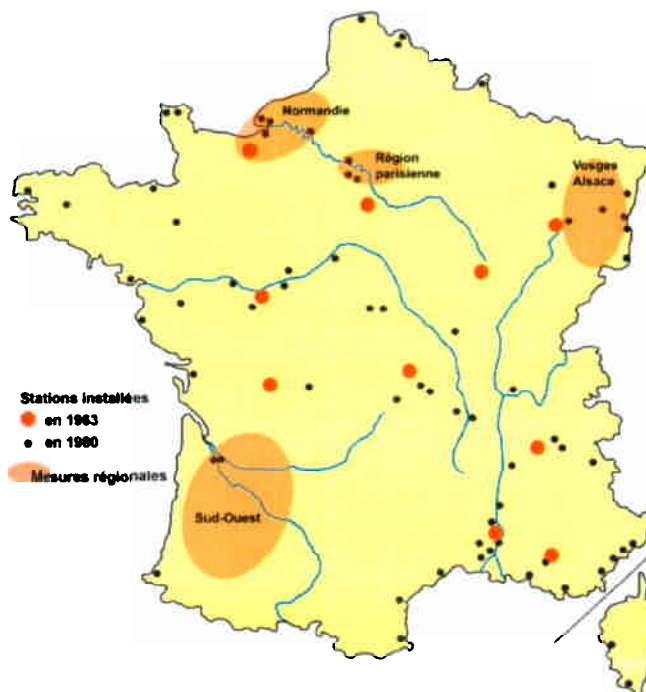


Figure 7 : Stations et régions de prélèvements d'échantillons du SCPRI en 1963 et en 1980

La plupart des produits de fissions présentés dans le tableau ont ainsi été mesurés mensuellement plus ou moins régulièrement depuis 1961. Cet ensemble de mesure est unique en ce sens que très peu de pays ont effectué aussi précocement des mesures de produits de fission dans l'environnement et que le plus souvent seuls ^{90}Sr et ^{137}Cs étaient mesurés (UNSCEAR 2000).

Parmi ces stations d'échantillonnage, celle du Vésinet en région parisienne a été choisie, d'une part parce qu'elle présente les séries de mesures les plus longues et les plus complètes, et d'autre part parce que la pluviosité moyenne annuelle en région Parisienne (650 à 700 mm) est assez représentative de la moyenne française.

Dans cette première partie de l'étude des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires, seules les mesures d'activités dans l'air et l'eau de pluie permettant de reconstituer les dépôts sont exploitées, ainsi que celles des herbages fournissant un élément de validation des dépôts. Les figures 8 et 9 présentent le nombre de mesures mensuelles de chaque produit de fission effectuées dans l'air et dans l'eau de pluie de 1961 à 1978 sur la station du Vésinet. Les séries du ^{137}Cs , ^{90}Sr et ^{95}Zr sont presque complètes. Pour ^{106}Ru et ^{103}Ru , elles sont assez représentatives. ^{144}Ce n'a été mesuré qu'entre 1961 et 1966 et entre 1974 et 1978. Les mesures de ^{140}Ba sont très rares, et celles de ^{131}I et ^{141}Ce exceptionnelles.

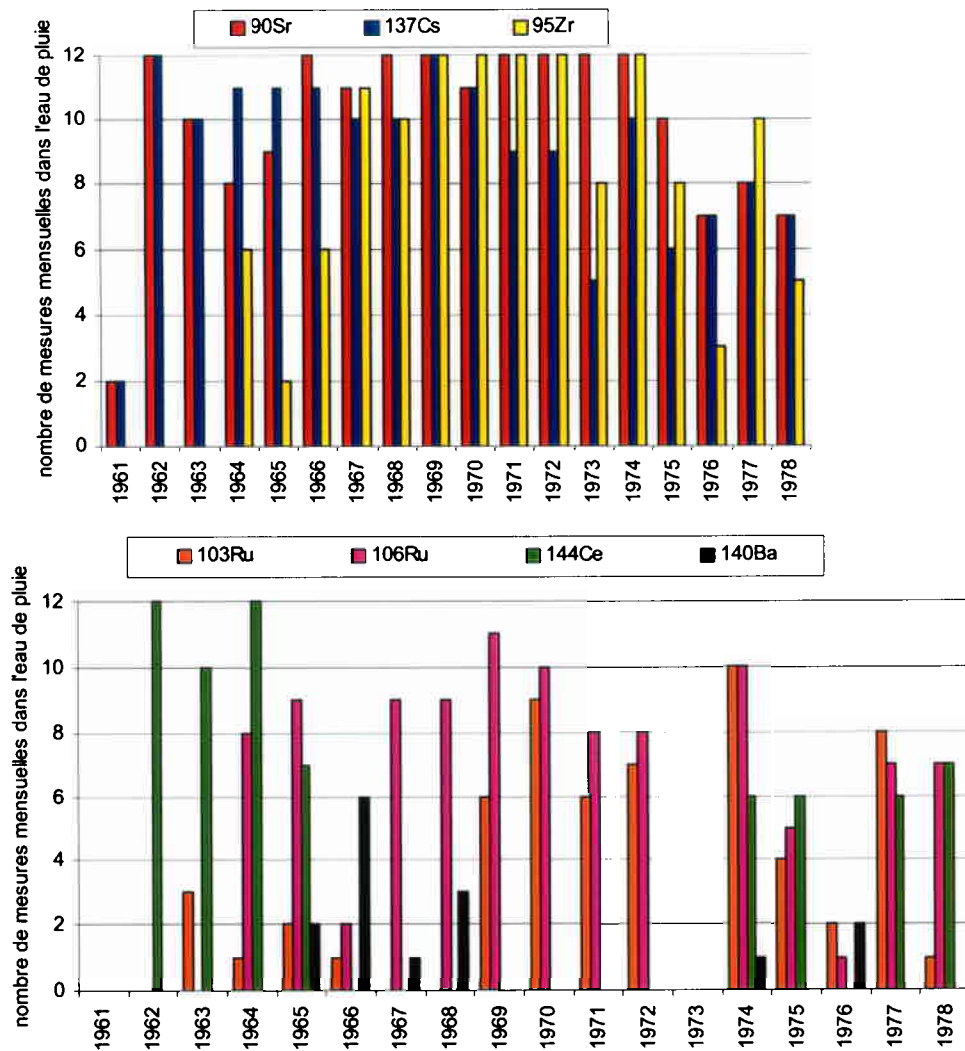


Figure 8 : Nombre de mesures mensuelles de chaque produits de fission effectuées dans l'air au niveau du sol de 1961 à 1978, sur la station du vésinet

Outre Le Vésinet, quatre autres sites représentatifs de la gamme des précipitations moyennes annuelles en France ont été choisis afin d'étudier l'influence de ces précipitations sur l'importance des dépôts : Sauveterre près d'Avignon en Provence (650 mm an⁻¹ de précipitations annuelles), Cléville en Normandie (750 mm an⁻¹), Vioménil en Bourgogne (1200 mm an⁻¹) et Méaudre dans le Vercors (1400 mm an⁻¹).

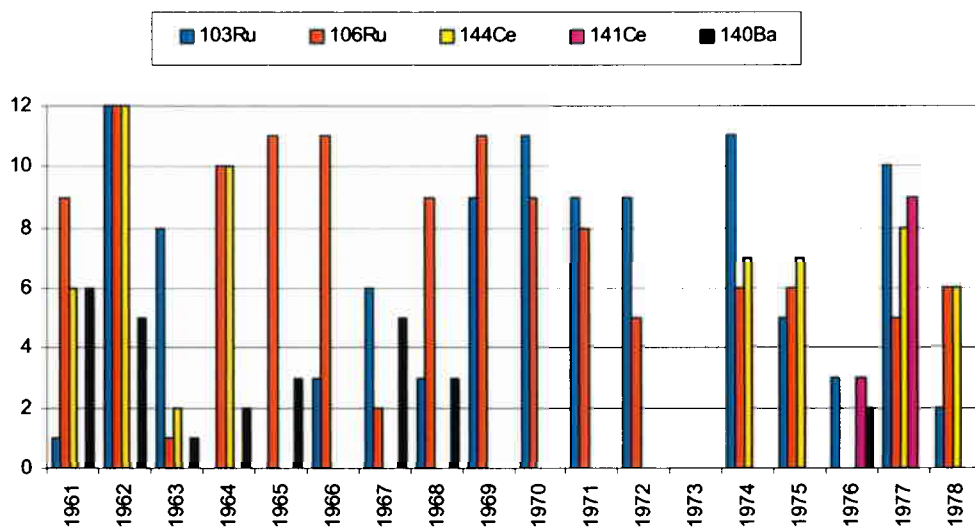
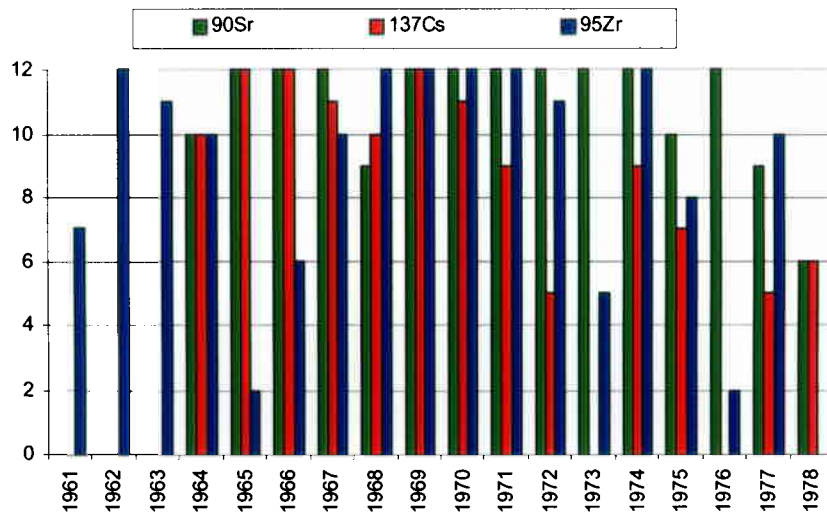


Figure 9 : Nombre de mesures mensuelles de chaque produit de fission effectuées dans l'eau de pluie de 1961 à 1978, sur la station du vésinet

4. CARACTÉRISATION DES DÉPÔTS RADIOACTIFS

4.1. Évaluation des dépôts par l'UNSCEAR

Depuis le début des années 60, l'UNSCEAR (United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) a fourni dans ses rapports des évaluations toujours réactualisées des retombées des essais atmosphériques, synthétisant un grand nombre de travaux, publications et résultats de mesures d'activités dans l'environnement.

Dans son rapport de 2000, l'UNSCEAR a fourni pour la première fois les retombées annuelles en PBq de chaque produit de fission depuis 1945 (Tableau 10 du rapport UNSCEAR 2000), ainsi que le coefficient latitudinal de dépôt qui permet d'estimer les dépôts en Bq.m^{-2} à partir des retombées globales exprimées en PBq. Aux latitudes de la France, entre 40° et 50° de latitude Nord, ce rapport est évalué par l'UNSCEAR à $7,01 \text{ Bq m}^{-2} \text{ PBq}^{-1}$. Ces estimations reposent principalement sur des mesures de ^{90}Sr dans l'air et dans l'eau de pluie, effectuées aux USA, en Grande-Bretagne et au Chili, et à partir desquelles un modèle de transfert atmosphérique et de dépôt a été établi. Faute de mesures suffisantes, les retombées des autres produits de fission ont été calculées au moyen de ce modèle en prenant en compte les rendements de fission et les périodes radioactives. Tous les produits de fission sont donc supposés avoir le même comportement depuis leur émission jusqu'à leur dépôt au niveau du sol. Les dépôts théoriques aux latitudes de la France, déduits des estimations de l'UNSCEAR, sont fournis en annexe 3.

4.2. Étude du rapport entre l'activité de l'eau de pluie et celle de l'air, lessivage

Lorsque les deux mesures étaient disponibles, le rapport entre l'activité de l'air et celle de l'eau de pluie, a été calculé. Ce rapport exprime le chargement des gouttes d'eau en aérosol radioactif sans distinction des processus d'inclusion des particules lors de la formation de la goutte d'une part (rainout), et de lessivage de l'air lors de la chute de la goutte (washout) d'autre part. Ce rapport est assez constant pour les quatre radionucléides étudiés, ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{137}Cs , autour d'une valeur moyenne de $5,0 \pm 2,0 \cdot 10^5 \text{ Bq m}^{-3}$ d'eau de pluie par Bq.m^{-3} d'air (Tableau 3). Ce résultat confirme l'hypothèse habituellement faite dans les modèles, que les processus concernés sont principalement physiques et indépendants de la nature et de la chimie du radionucléide fixé sur l'aérosol. Cette valeur est en bon accord avec l'estimation de De Bortoli (1974) obtenue à partir de données similaires en Italie de 1963 à 1971 : $6,9 \cdot 10^5$ (min $1,2 \cdot 10^5$, max $7,6 \cdot 10^6$) ou celle évaluée pour des isotopes stables ; $1,7 \cdot 10^5$ to $9 \cdot 10^5$ pour Cd et Pb (Peckar 1996) et $2 \cdot 10^5$ to $7 \cdot 10^5$ pour Cu, Ni, Co, Al (Chester et al. 1997). Compte tenu des précipitations annuelles au Vésinet, cette valeur de $5,0 \pm 2,0 \cdot 10^5$ correspond à un coefficient de lessivage de 10^{-4} s^{-1} , en bon accord avec les estimations habituelles (NRPB, 2001, Renaud et Louvat, 2003).

Tableau 3 : Rapports d'activités eau de pluie/air ($\times 10^5$), moyenne, écart type et nombre de rapports calculés entre parenthèses.

^{90}Sr	^{137}Cs	^{95}Zr	^{106}Ru	moyenne
$6,0 \pm 2,1$ (63)	$5,2 \pm 1,9$ (49)	$3,5 \pm 1,4$ (59)	$5,1 \pm 2,4$ (44)	$5,0 \pm 2,0$

4.3. Reconstitution des dépôts

A partir des mesures d'air et d'eau de pluie fournies par le SCPRI, les dépôts mensuels par temps sec et par temps de pluie, peuvent être estimés en appliquant l'équation 1.

$$D_m = D_{msec} + D_{mhum} = C_{air} \cdot V_d + C_{eau} \cdot H_{eau} \quad (1)$$

D_{mc} :	dépôt mensuel total	Bq/m ² .mois
D_{msec} :	dépôt mensuel par temps sec	Bq/m ² .mois
D_{mhum} :	dépôt mensuel par temps de pluie	Bq/m ² .mois
C_{air} :	concentration moyenne dans l'air durant le mois	Bq/m ³
V_d :	vitesse de dépôt des aérosols radioactifs	m/mois
C_{eau} :	concentration moyenne dans l'eau de pluie durant le mois	Bq/m ³
H_{eau} :	hauteur mensuelle des précipitations	m/m ³

La plupart des modèles de radioécologie utilisent une valeur de vitesse de dépôt comprise entre 10^{-3} m s⁻¹ et 10^{-2} m s⁻¹. C'est la valeur retenue dans le code de dispersion atmosphérique COTRAM de $5 \cdot 10^{-3}$ m s⁻¹ qui a été appliquée pour estimer les dépôts secs, en accord avec l'étude bibliographique de Sehmel (1980) révisée par le National Radiological Protection Board (NRPB, 2001), pour des particules micrométriques.

La figure 10 présente une évaluation des dépôts mensuels en région Parisienne entre 1955 et 1982. Entre 1961 et 1982 ces dépôts ont été calculés à partir des mesures d'activités dans l'air et dans l'eau de pluie, effectuées au Vésinet par le SCPRI au moyen de l'équation 1. Entre 1955 et 1959, l'évaluation n'est qu'indicative car elle repose sur des mesures effectuées en Grande-Bretagne (UNSCEAR, 1966), mais fournit néanmoins un ordre de grandeur de l'évolution des dépôts au cours de ces années. En 1960, les dépôts n'ont pu être reconstitués faute de mesures. Ils ont cependant dû être faibles, probablement inférieurs à $10 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{mois}^{-1}$, en raison du moratoire respecté par l'URSS, les USA et le Royaume-Uni.

S'il n'est pas possible de différencier les nombreux essais soviétiques et américains de 1961 et 1962 dont les retombées se sont prolongées en 1963 après la signature du traité, les pics d'activités d'un ordre de grandeur inférieur enregistrés à partir de 1968 correspondent, avec un délai de quelques mois, aux tirs aériens chinois de puissance mégatonnique. A partir de 1973, les activités en ⁹⁵Zr de l'air et de l'eau de pluie ont été de plus en plus souvent inférieures au seuil de mesure. Il n'est donc pas possible de reconstituer les très faibles dépôts correspondants, le plus souvent inférieurs à $5 \cdot 10^{-3} \text{ Bq m}^{-2} \text{ mois}^{-1}$. Après les retombées du dernier tir chinois d'octobre 1980 qui se sont prolongées jusqu'en 1982, ⁹⁵Zr n'a plus été mesuré en France, ni dans l'air, ni dans l'eau de pluie, excepté très ponctuellement et à un niveau très faible au cours de la première semaine de mai 1986 lors du passage des masses d'air contaminées par l'accident de Tchernobyl.

La figure 11 présente les dépôts mensuels de ⁹⁰Sr, ⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Ru, ¹³⁷Cs et ¹⁴⁴Ce en région parisienne entre 1961 et 1978 reconstitués à partir des mesures d'activités dans l'air et dans l'eau de pluie, effectuées au Vésinet. Les évolutions sont similaires pour tous les radionucléides. Les dépôts de ⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Ru et ¹⁴⁴Ce sont de même importance et d'un ordre de grandeur, supérieurs à ceux de ¹³⁷Cs et ⁹⁰Sr. Ceci est confirmé par les rapports d'activité isotopiques calculés à partir des mesures d'air et d'eau de pluie (Tableau 4).

Tableau 4 : Rapports des activités des différents produits de fission à celles du ^{137}Cs

	$^{144}\text{Ce}/^{137}\text{Cs}$	$^{95}\text{Zr}/^{137}\text{Cs}$	$^{103}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$	$^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$
eau	$10 \pm 6,7$ (60)	$6,8 \pm 4,8$ (98)	$2,1 \pm 1,4$ (46)	$7,5 \pm 4,0$ (92)	$0,7 \pm 0,2$ (146)
air	$11 \pm 6,4$ (31)	$11 \pm 7,1$ (88)	$3,0 \pm 2,2$ (62)	$7,7 \pm 3,9$ (88)	$0,6 \pm 0,2$ (113)
UNSCEAR*	9,4 - 12 - 14	7,8 - 11 - 15	5,8 - 11 - 20	4,7 - 7 - 7	0,62 - 0,62 - 0,62

* 1 : rapport d'activité des dépôts totaux, UNSCEAR 1982, 2 : UNSCEAR 2000, 3 : Rapport d'activité moyen des dépôts annuels, UNSCEAR 2000

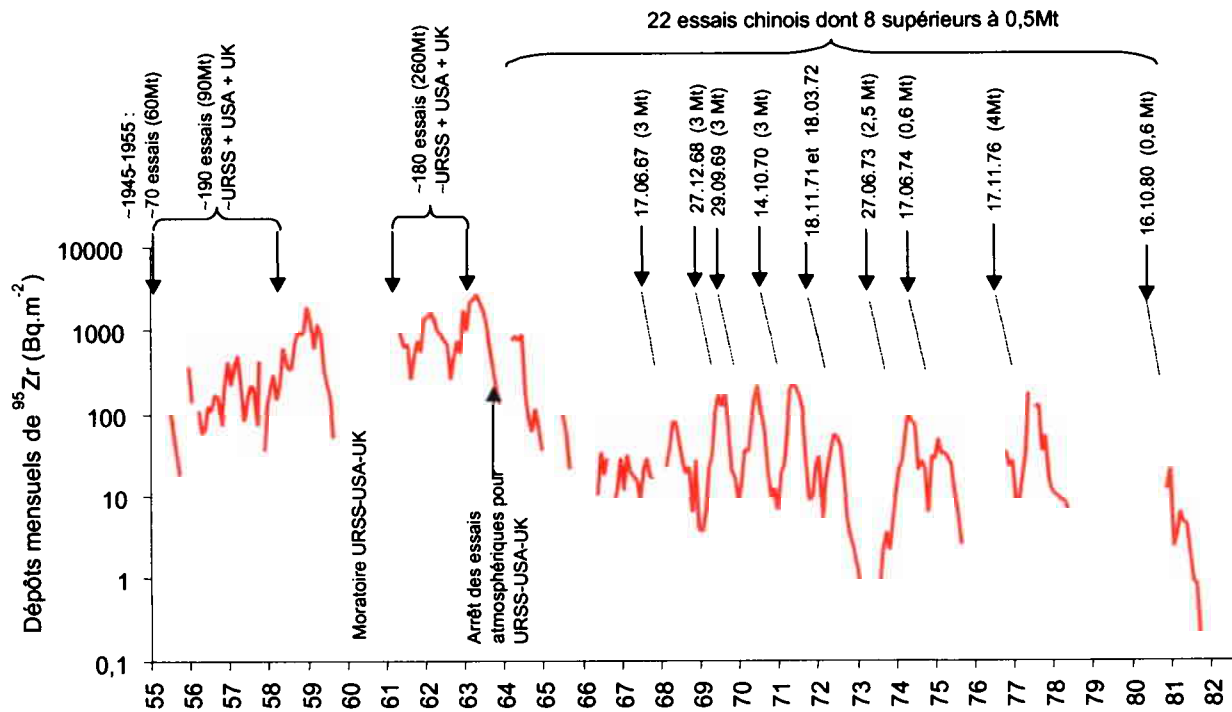


Figure 10 : Dépôts de ^{95}Zr en région parisienne entre 1955 et 1982.

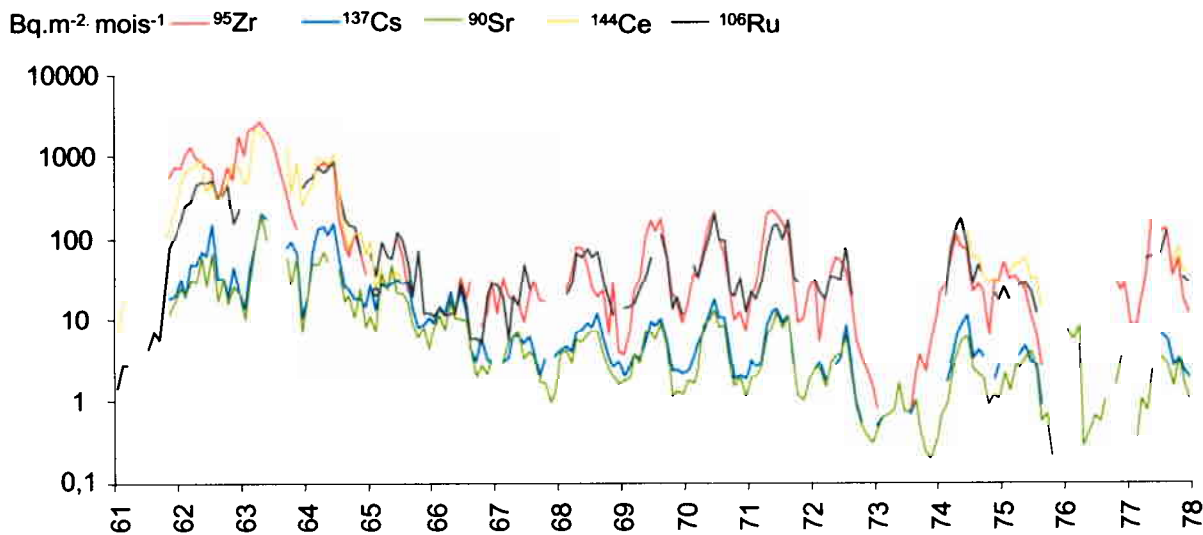


Figure 11 : Dépôts de ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{137}Cs et ^{144}Ce en région Parisienne entre 1961 et 1978 (Renaud et Louvat, 2003)

4.4. Comparaison avec les estimations de l'UNSCEAR,

La figure 12 permet de comparer les dépôts annuels au Vésinet à ceux estimés par l'UNSCEAR aux latitudes de la France entre 1961 et 1977 (Renaud et Louvat, 2003). Pour ^{90}Sr et ^{137}Cs , de période longue, la concordance est très satisfaisante. L'écart moyen sur la période est inférieur à 10%. L'écart le plus important correspond à l'année 1975 avec des dépôts au Vésinet supérieurs de 50% à ceux estimés par l'UNSCEAR. Pour les éléments de période moyenne comme ^{144}Ce et ^{106}Ru , les dépôts au Vésinet sont respectivement 30% et 70% supérieurs en moyenne sur la période, avec des écarts atteignant un facteur 3 certaines années. Pour ^{95}Zr et ^{103}Ru , de période courte, les dépôts au Vésinet sont supérieurs aux estimations de l'UNSCEAR avec des écarts pouvant atteindre un facteur 5 lors des périodes de transition inter-tirs (^{95}Zr en 1964). Ces écarts sont probablement liés à une surestimation par l'UNSCEAR des temps de résidence dans l'atmosphère, particulièrement sensible pour les périodes courtes et sans conséquences pour les périodes longues.

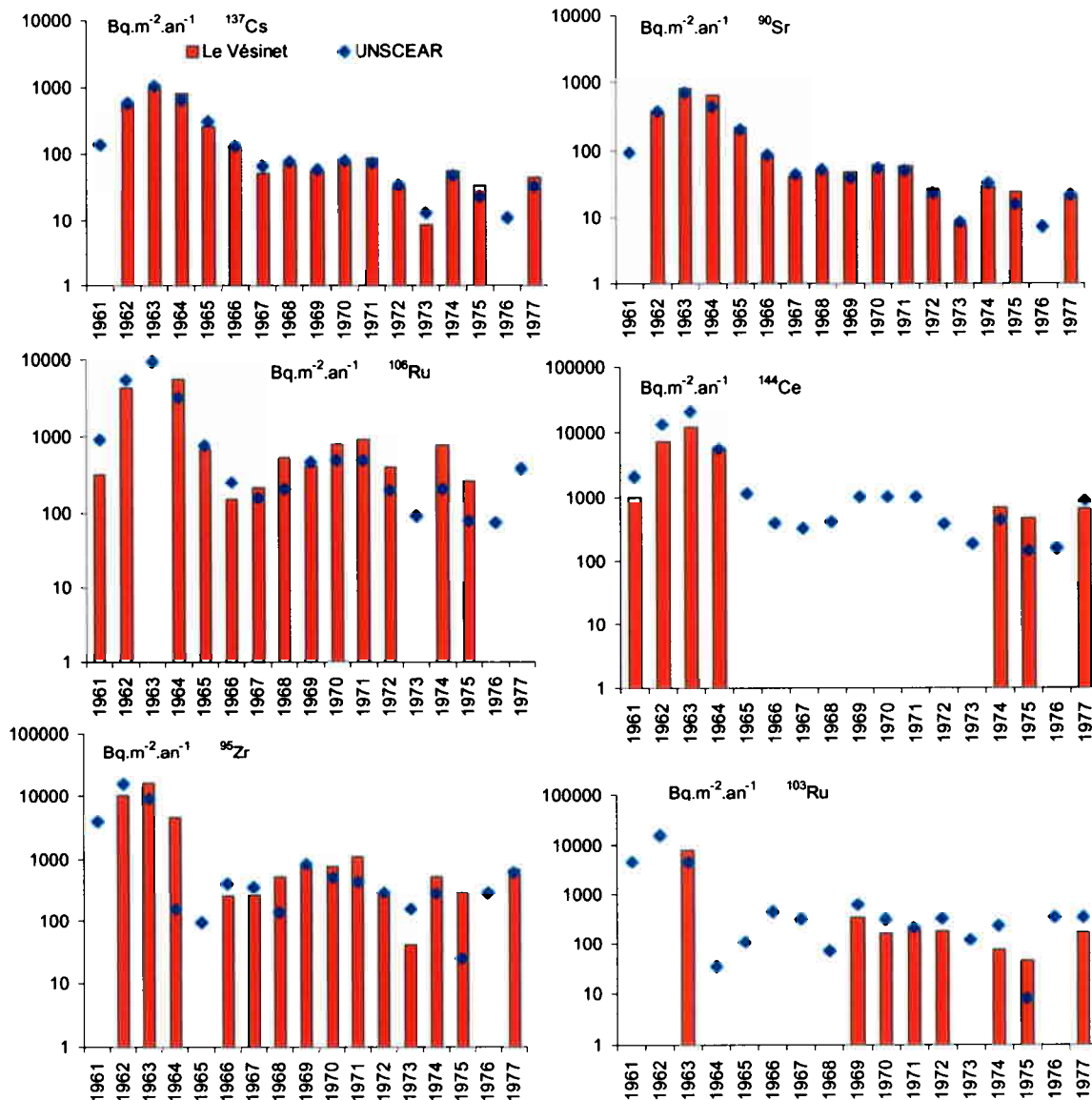


Figure 12 : Comparaison des dépôts annuels de ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{144}Ce , ^{106}Ru et ^{103}Ru reconstitués à partir des mesures au Vésinet et estimés par l'UNSCEAR sous nos latitudes.

4.5. Cas des radionucléides de période courte : ^{103}Ru , ^{131}I , ^{140}Ba et ^{141}Ce

Les quelques mesures d' ^{131}I ($T_{1/2} = 8$ jours), de ^{140}Ba ($T_{1/2} = 13$ jours) et de ^{141}Ce ($T_{1/2} = 33$ jours) ne permettent pas de reconstituer les dépôts au Vésinet. Les retombées troposphériques des éléments de périodes courtes consécutives à chaque tir ne pouvaient durer que de quelques jours à quelques semaines comme le montre les évolutions des activités de ^{103}Ru , ^{131}I , ^{140}Ba et ^{141}Ce dans l'air du Vésinet de 1976 à 1978 présentées dans la figure 13. Les pics d'activités correspondent aux 4 essais chinois des 26 septembre et 17 novembre 1976 (0,1Mt et 4 Mt), 17 septembre 1977 (0,02 Mt) et 15 mars 1978 (0,02 Mt). Les deux autres essais chinois effectués durant cette période, des 23 janvier 1976 (0,02 Mt) et 14 décembre 1978 (0,02 Mt) n'ont pas donné lieu à des activités mesurables dans l'air parisien car inférieures au seuil de mesure de $2 \cdot 10^{-4} \text{ Bq m}^{-3}$. Le fait que les tirs effectués en hiver donnent de faibles retombées a été souvent constaté (UNSCEAR, 1982). Seuls ^{103}Ru et ^{141}Ce ont été mesurés, très ponctuellement, consécutivement au dernier essai chinois d'octobre 1980 pourtant de plus forte puissance (0,6 Mt).

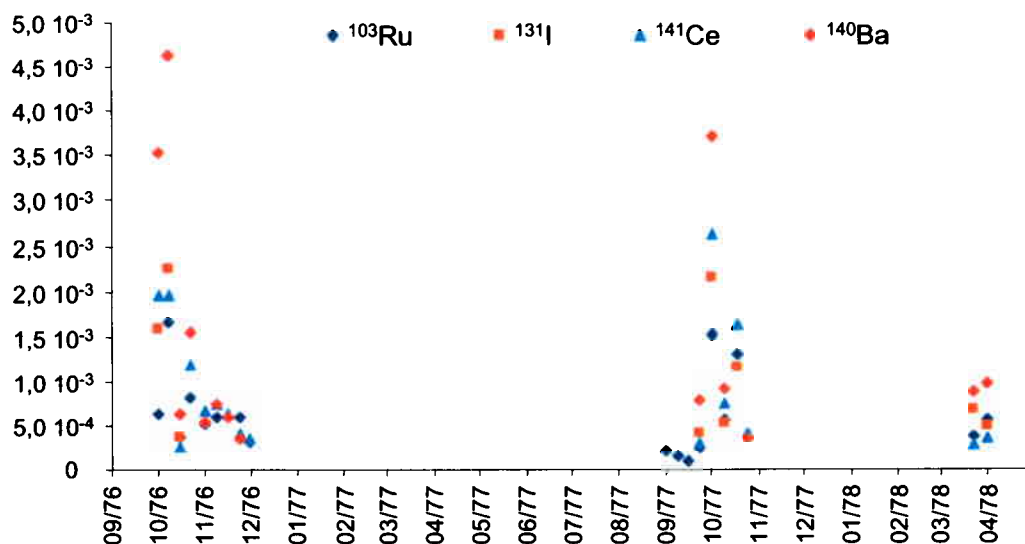


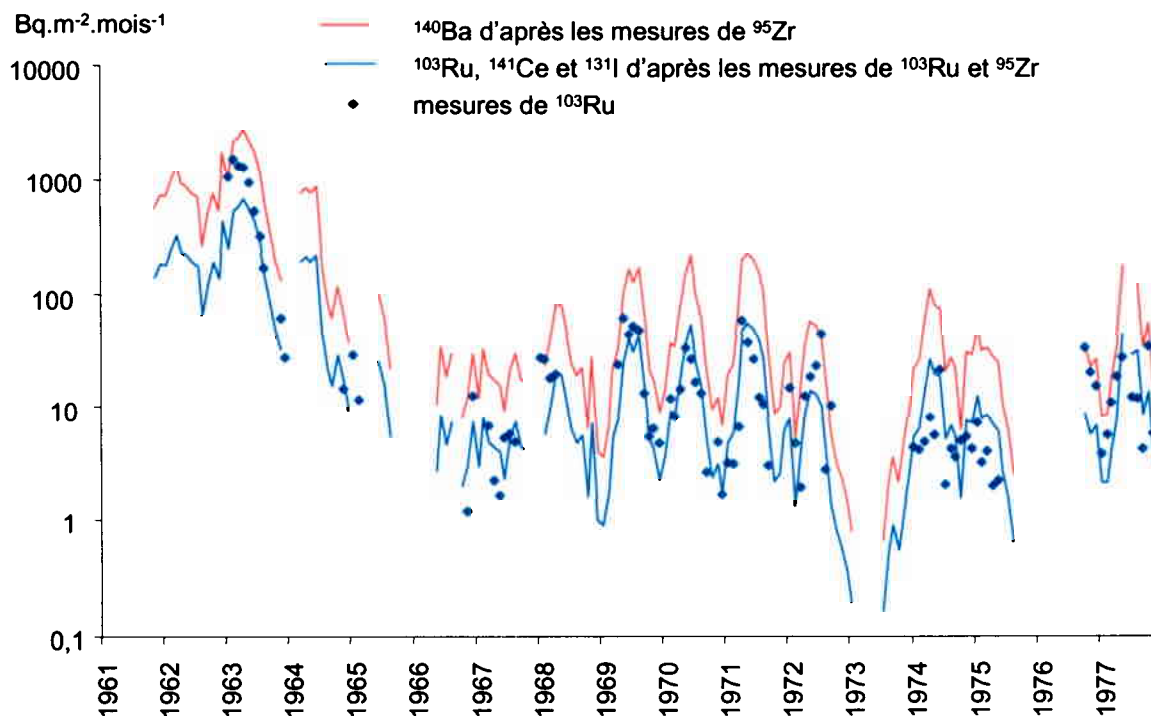
Figure 13 : Activités de ^{103}Ru , ^{131}I , ^{140}Ba et ^{141}Ce dans l'air du Vésinet de 1976 à 1978

Compte tenu de cette faible rémanence, comparée aux nucléides de périodes moyennes ou longues, les activités de ces radionucléides de période courte ne peuvent être comparées qu'entre elles. Ainsi le tableau 5 montre que les retombées de ^{140}Ba ont été du même niveau que celles de ^{95}Zr , en bon accord avec les estimations de l'UNSCEAR (UNSCEAR 2000). Elles sont près de deux fois supérieures à celles de ^{103}Ru , ^{131}I et ^{141}Ce . Les valeurs médianes des rapports $^{140}\text{Ba}/^{131}\text{I}$ mesurés en Argentine entre 1966 et 1973 et au Royaume-Uni sont respectivement $1,7 \pm 0,8$ et $2,0 \pm 1,1$ (UNSCEAR, 1982), proches de la moyenne calculée au Vésinet et figurant dans ce tableau : $1,8 \pm 0,3$. Les rapports isotopiques $^{141}\text{Ce}/^{131}\text{I}$, $^{103}\text{Ru}/^{131}\text{I}$ et $^{103}\text{Ru}/^{141}\text{Ce}$, confirment que les retombées de ces trois radionucléides ont été voisines.

Tableau 5: Rapports d'activités des radionucléides de période courte mesurés dans l'air au Vésinet de 1976 à 1978

$^{95}\text{Zr}/^{140}\text{Ba}$	$^{95}\text{Zr}/^{103}\text{Ru}$	$^{140}\text{Ba}/^{103}\text{Ru}$	$^{140}\text{Ba}/^{131}\text{I}$	$^{140}\text{Ba}/^{141}\text{Ce}$	$^{141}\text{Ce}/^{131}\text{I}$
$1,4 \pm 0,9$	$4,4 \pm 3,2$	$2,0 \pm 1,1$	$1,8 \pm 0,3$	$1,7 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,4$

Les séries relativement complètes de mesures de ^{95}Zr et de ^{103}Ru permettent ainsi de fournir une évaluation des dépôts mensuels de ^{131}I , ^{141}Ce et ^{140}Ba (Figure 14).



4.6. Influence des précipitations moyennes annuelles sur l'importance des dépôts

Les dépôts lors de pluie sont toujours plus importants que les dépôts par temps sec. Par temps sec l'activité mise en jeu est celle contenue dans l'air au niveau du sol ; les aérosols étant projetés à la surface du sol par les turbulences de l'air conduisant à de faibles vitesses de dépôt. Lors de pluie, c'est toute la colonne d'air traversée par les gouttes d'eau qui contribue au dépôt humide ; les gouttes lessivant l'air et précipitant les aérosols à la surface du sol.

La valeur moyenne et l'écart type du rapport entre les dépôts humides et les dépôts secs mensuels des 6 radionucléides présentant les séries les plus longues est donnée dans le tableau 6. Ce rapport est assez constant quelque soit le radionucléide, entre 1,6 et 2,5, avec une moyenne de 2. Ainsi en région parisienne, pour une hauteur de précipitation annuelle de l'ordre de 650 à 700 mm.an⁻¹, les pluies ont constitué en moyenne les deux tiers des dépôts mensuels. Ces résultats confirment par ailleurs que les processus intervenants dans les dépôts sont principalement physiques et sont indépendants du radionucléide, comme cela avait été constaté lors de l'étude du rapport entre les activités de l'air et de l'eau de pluie (cf § 4.2).

Tableau 6 : Moyenne et écart type des rapports mensuels des dépôts humides et secs au Vésinet de 1961 à 1978. (nombre de rapports calculés sur la période).

⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁵ Zr	¹⁰³ Ru	¹⁰⁶ Ru	¹⁴⁴ Ce	moyenne
2,3 ± 1,1 (107)	2,5 ± 1,3 (147)	1,6 ± 1,0 (108)	2,2 ± 1,3 (50)	1,9 ± 1,1 (74)	1,7 ± 1,1 (42)	2,0

Les fluctuations autour de cette valeur moyenne sont importantes comme l'indiquent les valeurs des écarts types. La figure 15 qui présente les rapports mensuels des dépôts humide/sec entre 1961 et 1978 pour ⁹⁰Sr et ¹³⁷Cs, montre que ce rapport a été inférieur à 0,5 les mois peu pluvieux et a pu dépasser 6 les mois très pluvieux. La confrontation des valeurs moyennes mensuelles de ce rapport avec les hauteurs moyennes mensuelles des précipitations sur la station de Météo-France de Paris-Villacoublay montre une assez bonne relation du début du printemps à la fin de l'automne. Ce n'est pas le cas en hiver et cette étude mériterait un développement pour la compréhension des processus que sous-tendent ces évolutions.

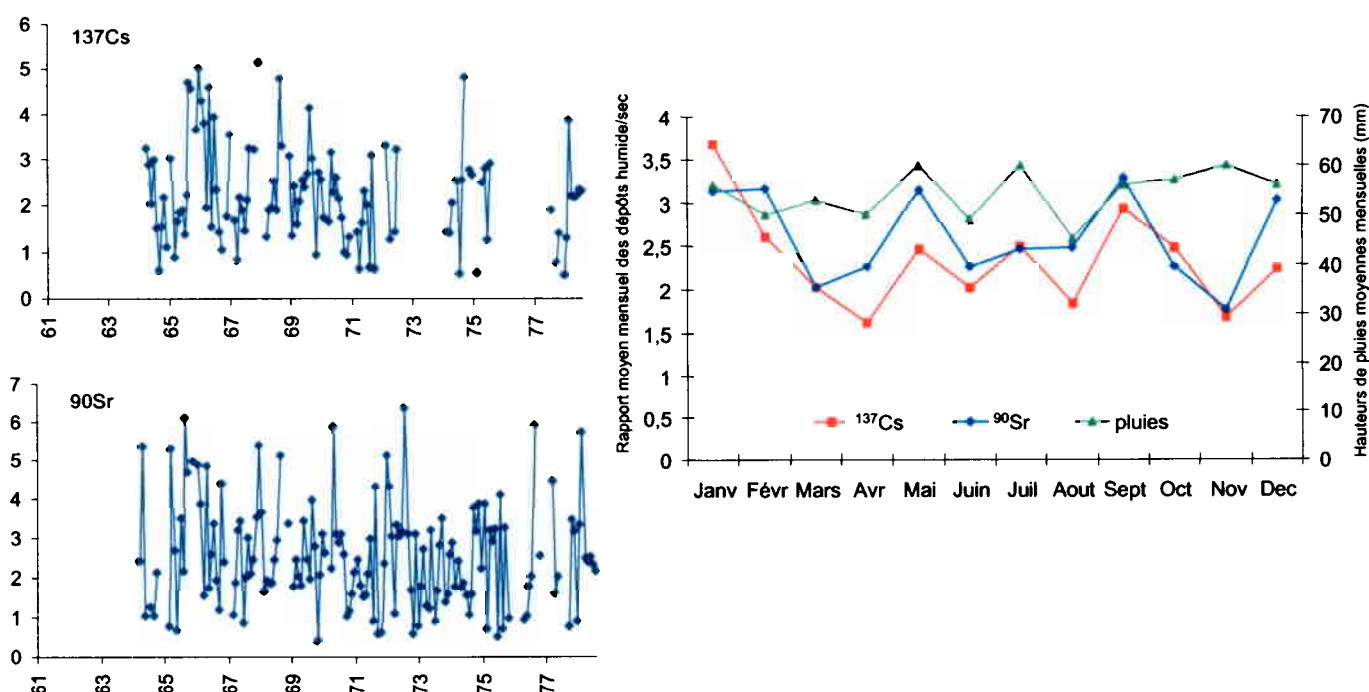


Figure 15 : Évolution des rapports mensuels entre les dépôts humides et secs de 1964 à 1978 (graphiques de gauche) et comparaison entre le rapport moyen mensuel des dépôts humides/sec et les hauteurs moyennes mensuelles de précipitations (graphique de droite).

Compte tenu de l'importance de la contribution du dépôt humide au dépôt total, l'influence des précipitations moyennes annuelles sur l'intensité des dépôts a été étudiée à partir des dépôts reconstitués sur 4 stations du SCPRI, représentatives de la gamme des précipitations moyennes annuelles en France : Sauveterre près d'Avignon en Provence (650 mm/an de précipitations annuelles), Cléville en Normandie (750 mm/an), Vioménil en Bourgogne (1200 mm/an) et Méaudre dans le Vercors (1400 mm/an). La figure 16 montre que les dépôts cumulés entre 1967 et 1972 augmentent avec les hauteurs de pluies. Ainsi, à Méaudre les dépôts ont été deux fois plus importants qu'à Sauveterre et ceci quelque soit le radionucléide. Cette corrélation est tout à fait conforme aux résultats d'études étrangères, dont certaines ont abouti à une quantification de la relation

pluie/dépôts, notamment, les travaux de Mitchell en Irlande (1990) et de Bunzl & Kracke en Allemagne (1988) (Renaud et Louvat, 2003).

A partir de la relation de Mitchell (Mitchell et al, 1990) validée sur la France par les mesures du SCPRI, et de la carte des précipitations moyennes annuelles, il est possible d'établir la carte des dépôts cumulés¹ de ¹³⁷Cs dues aux retombées des tirs atmosphériques d'armes nucléaires (Figure 17). Cette carte montre que sur la majeure partie de la France, les dépôts cumulés de ¹³⁷Cs de 1945 à 1980 sont compris entre 4000 et 6000 Bq m⁻², en bon accord avec les estimations de l'UNSCEAR sous nos latitudes (5000 Bq m⁻²). Les régions les plus arrosées ont pu recevoir des dépôts supérieurs à 8000 Bq m⁻². La carte des dépôts cumulés des autres produits de fission peut en être déduite par application des rapports d'activités isotopiques.

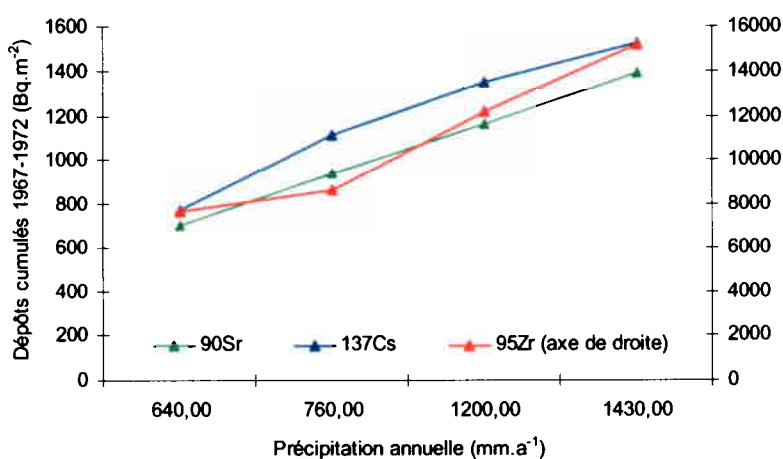


Figure 16 : Influence des hauteurs de précipitations moyennes annuelles sur l'importance des dépôts cumulés de ¹³⁷Cs de 1967 à 1972 sur quatre sites français

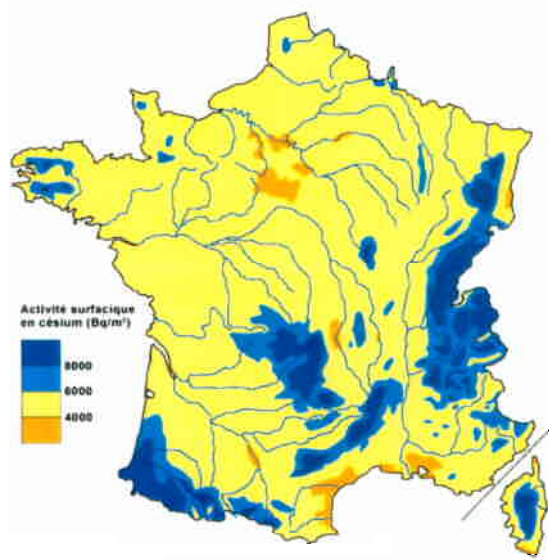


Figure 17 : Carte des dépôts cumulés de ¹³⁷Cs en France de 1945 à 1980

¹ Par "dépôt cumulé" on entend la somme des dépôts annuels de 1945 à 1980, sans tenir compte de la décroissance radioactive.

5. ACTIVITÉS DES HERBAGES ET VALIDATION DES DÉPÔTS

5.1. Relation entre les activités des herbages et les dépôts mensuels correspondants

Depuis 1961, l'activité de certains produits de fission dans les herbages a également été mensuellement mesurée par le SCPRI sur plusieurs stations et notamment au Vésinet. Ces activités témoignent des dépôts effectivement parvenus à la surface du sol. Elles constituent donc un élément important de validation des dépôts précédemment reconstitués.

Il s'agit ici de vérifier que les dépôts mensuels calculés précédemment sont cohérents avec les mesures effectuées mensuellement sur l'herbe, apportant ainsi un élément de validation important. L'activité de l'herbe, qui résulte principalement du dépôt direct sur les feuilles, est en effet un bon indicateur des dépôts, notamment pour les radionucléides de période courte pour lesquels il est possible de négliger l'accumulation dans le sol et donc le transfert racinaire susceptible de brouiller la relation dépôt/herbe.

Le tableau 7 montre qu'il existe un rapport assez constant entre l'activité de l'herbe et le dépôt mensuel du mois correspondant, compris entre 0,4 et 0,7 Bq kg⁻¹ d'herbe fraîche par Bq m⁻² déposé dans le mois, excepté pour ⁹⁰Sr.

Tableau 7 : Valeur moyenne et écart type du rapport entre les activités mesurées dans l'herbe et celles déposées durant le mois correspondant (nombre de rapports calculés)

⁹⁵ Zr	¹⁰³ Ru	¹⁰⁶ Ru	¹⁴⁴ Ce	¹⁴⁰ Ba	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
0,5 ± 0,3 (135)	0,4 ± 0,2 (64)	0,4 ± 0,2 (20)	0,7 ± 0,3 (30)	0,4 ± 0,3 (15)	0,5 ± 0,3 (99)	1,5 ± 1,5 (144)

Pour ce radionucléide, le rapport moyen est plus élevé et s'accompagne d'une forte dispersion. La figure 18 permet de distinguer deux périodes.

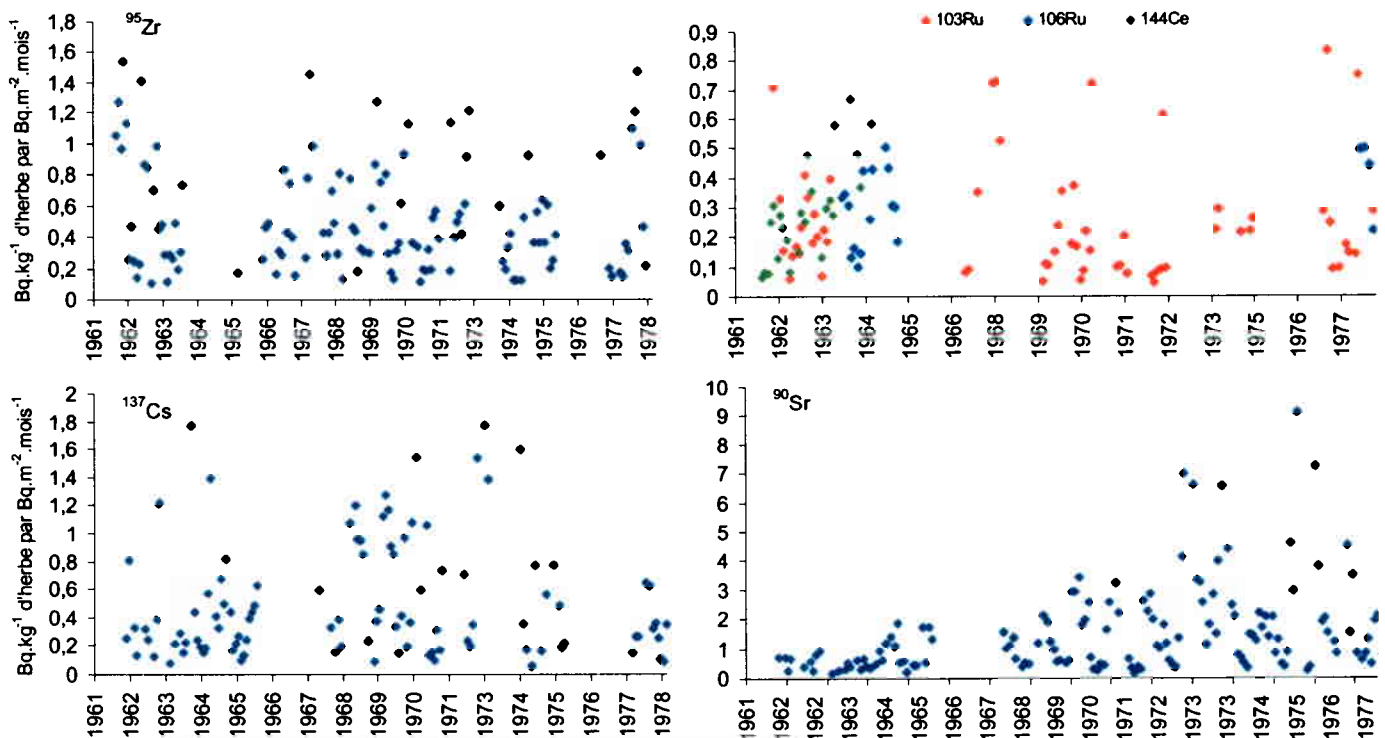


Figure 18 : Evolution du rapport entre l'activité de l'herbe et celle du dépôt mensuel correspondant de 1961 à 1978

Une première période de 1961 à 1965 durant laquelle le rapport des activités herbe/dépôt, égal à $0,5 \pm 0,3$, est proche de celui des autres radionucléides. Durant ces années, les dépôts mensuels de ^{90}Sr importants contribuaient à l'essentiel de l'activité mesurée dans l'herbe. De 1965 à 1978, le rapport des activités ne cesse d'augmenter en liaison avec la diminution des dépôts et l'augmentation du transfert par le sol dans l'activité mesurée dans l'herbe.

5.2. Détermination des valeurs des paramètres radioécologiques

Le transfert de l'activité déposée à l'herbe s'exprime dans la plupart des modèles de la manière suivante (équation [2]) :

$$A_{herbe} = D_d \cdot R/Y \cdot \frac{(1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_r)t})}{\lambda_b + \lambda_r} + A_{cum} \cdot FT_{s-p} \quad [2]$$

A_{herbe}	activité de l'herbe	(Bq kg ⁻¹) ;
D_d	dépôt quotidien	(Bq m ⁻² ·j ⁻¹) ;
R/Y	facteur d'interception massique	(m ² kg ⁻¹) ;
λ_b	constante de décroissance biomécanique de l'activité dans l'herbe	(j ⁻¹) ;
λ_r	constante de décroissance radioactive	(j ⁻¹) ;
t	nombre de jours par mois	(j) ;
A_{cum}	Activité cumulée dans le sol	(Bq m ⁻²) ;
FT_r	facteur de transfert sol-plante	(m ² kg ⁻¹) ;

Le premier terme de cette équation correspond au transfert foliaire direct. Le second est relatif au transfert par le sol. Pour les radionucléides de période courte qui ne s'accumulent pas dans le sol, le transfert racinaire par le sol peut être négligé. Il en résulte que, pour ces radionucléides, le rapport entre l'activité de l'herbe et celle du dépôt mensuel correspond au premier terme de l'équation. A ce rapport correspond donc un jeu de deux paramètres, [R/Y, λ_b], bien connus en radioécologie.

Pour une valeur très consensuelle de λ_b égale à $0,05 \text{ j}^{-1}$ (Boone et al. 1981 ; Hoffman et al. 1984 ; Müller and Pröhl 1993 ; IAEA 1994 ; Brown and Simmonds 1995 ; USNRC/CCE 1997 ; Renaud et al. 1999), la valeur du rapport R/Y serait comprise entre $0,5$ et $0,9 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ d'herbe fraîche (5 à $9 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ d'herbe sèche). Ces valeurs sont en bon accord avec celles proposées par les experts pour le dépôt humide de cations lors de précipitations faibles à moyennes (IAEA 1994 ; USNRC/CCE 1997) qui caractérisent les épisodes pluvieux et les brouillards en région parisienne.

L'utilisation de ces valeurs dans l'équation 2 permet de calculer l'activité théorique de l'herbe à partir du dépôt mensuel. Le rapport entre les activités ainsi calculées et les activités mesurées dans l'herbe témoigne de l'ajustement du modèle obtenu. Pour les radionucléides à vie courte, des valeurs de R/Y comprises entre $0,5$ et $0,9 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ et une valeur de λ_b fixée à $0,05 \text{ j}^{-1}$ permettent l'obtention d'un rapport moyen proche de 1 entre l'activité mensuelle de l'herbe calculée à partir des dépôts et celle mesurée (Tableau 8). La figure 19 qui illustre l'évolution mensuelle de ce rapport entre 1961 et 1978 pour le ^{95}Zr , montre qu'il est constant dans le temps avec cependant un écart type élevé (0,6).

Tableau 8 : Valeurs du rapport R/Y pour l'obtention d'un rapport entre l'activité de l'herbe calculée/mesurée proche de 1, pour une valeur de λ_b fixée à $0,05 \text{ a}^{-1}$.

	^{95}Zr	^{103}Ru	^{106}Ru	^{144}Ce	^{140}Ba
[R/Y, λ_b]	[0,7 ; 0,05]	[0,5 ; 0,05]	[0,5 ; 0,05]	[0,9 ; 0,05]	[0,7 ; 0,05]
Rapport cal/mes	$1,0 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,6$	$0,9 \pm 0,5$

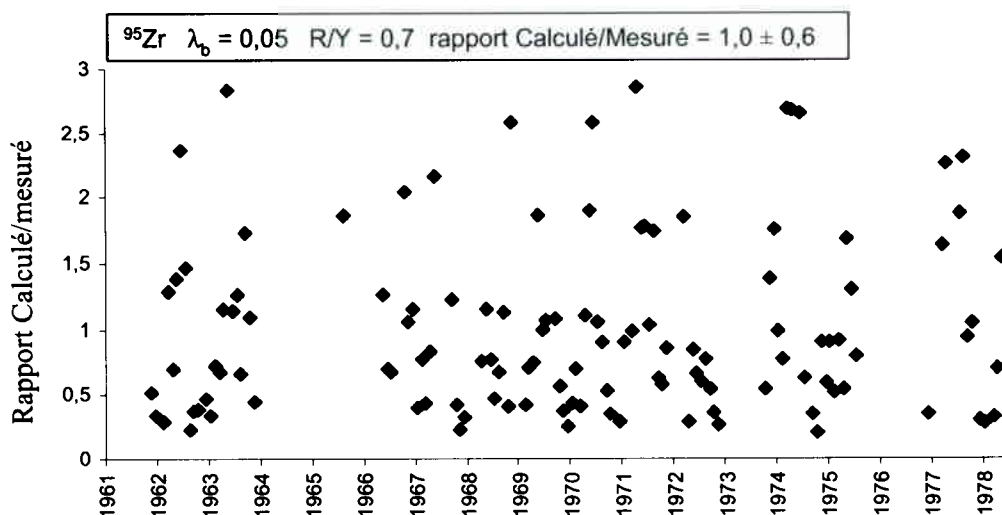


Figure 19 : Évolution mensuelle du rapport entre l'activité mensuelle de l'herbe calculée à partir des dépôts et celle mesurée de 1961 à 1978 pour le ^{95}Zr

En raison de leur longue période de respectivement 28 et 30 ans, le ^{90}Sr et le ^{137}Cs s'accumulent dans les sols. Homologues chimiques du calcium et du potassium, leur accumulation peut avoir donné lieu à un transfert racinaire. Le tableau 9 montre que la prise en compte du seul transfert foliaire suffit à expliquer les activités de ^{137}Cs mesurées dans l'herbe. Un couple $[R/Y ; \lambda_b]$ égal à $[0,5 ; 0,05]$, dans la gamme de ceux obtenus pour les radionucléides de période courte, permet un bon ajustement du rapport « calculé/mesuré » et ceci de 1961 à 1978 (Figure 20). Pour ce radionucléide, la contribution du transfert racinaire à l'activité mesurée est restée trop faible pour être mise en évidence, même au cours des années 70, durant lesquelles les dépôts étaient les plus faibles et l'accumulation dans les sols maximale. Il n'en est pas de même pour le ^{90}Sr , pour lequel deux phases peuvent être distinguées. De 1961 à 1964, période durant laquelle les dépôts étaient importants, le transfert foliaire permet d'expliquer les activités mesurées avec un couple $[R/Y ; \lambda_b]$ égal à $[0,5 ; 0,05]$. Après 1964, le transfert foliaire ne permet d'expliquer que 40% des activités mesurées. Au cours de ces années, le transfert par le sol représente la voie de contamination principale de l'herbe.

Tableau 9 : Valeurs du rapport R/Y et rapport entre l'activité de l'herbe calculée/mesurée correspondant pour une valeur de λ_b fixée à $0,05 \text{ j}^{-1}$.

	^{137}Cs	^{90}Sr (1961-1964)	^{90}Sr (1965-1978)
[R/Y ; λ_b]	[0,6 ; 0,05]	[0,7 ; 0,05]	[0,7 ; 0,05]
Rapport cal/mes	$1,0 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,6$	$0,4 \pm 0,3$

Complémentaire à l'étude du rapport calculé/mesuré, la figure 20 permet de comparer visuellement les activités mesurées dans l'herbe à celles calculées à partir des dépôts précédemment reconstitués.

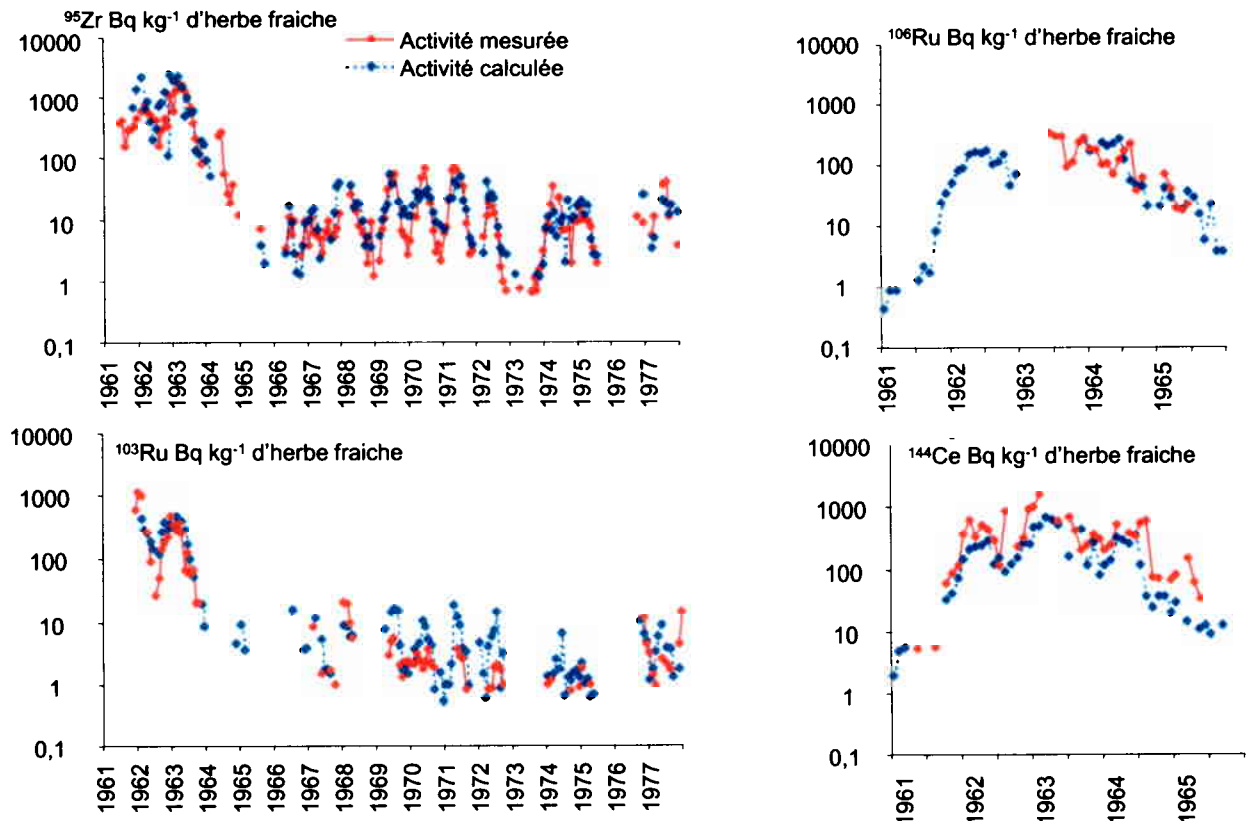


Figure 20 : Comparaison des activités de ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{106}Ru et ^{144}Ce calculées et mesurées dans l'herbe.

6. CONCLUSION

Cette reconstitution des dépôts radioactifs consécutifs aux essais atmosphériques d'armes nucléaires, à partir des mesures effectuées en France depuis 1961, constitue une base solide pour les évaluations dosimétriques contemporaines de ces retombées.

Outre ^{137}Cs et ^{90}Sr pour lesquels de nombreuses mesures ont été effectuées dans différents pays, les mesures effectuées en France ont porté également sur des radionucléides beaucoup moins connus comme ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{140}Ba , ^{144}Ce , et ^{141}Ce , dont les dépôts ont été estimés et validés par les activités mesurées dans l'herbe à cette époque. Ces radionucléides déposés ont délivré une dose susceptible d'atteindre 40% de la dose totale (Bouville et al, 2002).

La comparaison de leur comportement dans les processus de transfert atmosphérique et de dépôt ont permis de dégager des paramètres utilisables pour reconstituer les dépôts

d'autres produits de fission ou d'activation qui ont fait l'objet de très peu, voire d'aucune mesure : ^{91}Y , ^{125}Sb et les isotopes du plutonium.

Des éléments, qui permettront par recoupement avec des données d'autres natures, une reconstitution des dépôts de ^{131}I et donc des doses à la thyroïdes contemporaines des essais sont également fournis.

La caractérisation des dépôts pluvieux et l'étude de la relation entre les dépôts de ^{137}Cs et les précipitations moyennes annuelles, permettent de disposer d'une carte de France des dépôts cumulés de ^{137}Cs dus aux essais. Par ailleurs, l'étude de la relation établie entre l'activité de l'air et celle de l'eau de pluie, permet de déduire des cartes analogues pour tous les radionucléides étudiés, excepté l'iode pour lequel on peut supposer un comportement particulier vis à vis des processus de dépôt sec et humide. Ces cartes des dépôts cumulés permettront d'évaluer plus précisément les doses reçues par les personnes résidents dans les zones montagneuses les plus touchées.

40 ans après la fin de la principale phase des retombées (1960-1963), deux des produits de fission étudiés sont encore aujourd'hui présents dans les sols : ^{90}Sr et ^{137}Cs . L'évaluation des doses actuelles imputables aux essais atmosphériques d'armes nucléaire nécessite d'étudier la rémanence des activités déposées en relation avec les caractéristiques des sols. Cette étude est actuellement en cours.

7. BIBLIOGRAPHIE

Boone FW, NG YC, Palms JM. Terrestrial pathways of radionuclide particulates. *Health Phys* 41:735-747; 1981.

Bennett BG. Worldwide dispersion and deposition of radionuclides produced in atmospheric tests. *Health Phys* 41:644-655; 2002.

Bouville A, Simon SL, Miller CW, Beck HL, Anspaugh LR, Bennett BG. Estimates of doses from Global Fallout. *Health Phys* 82:690-705; 2002.

Brown J, Simmonds JR. FARMLAND: A dynamic model for the transfer of radionuclides through terrestrial food chains. National Radiological Protection Board publication NRPB-R273. 1995.

Bunzl K, Kracke W. Cumulative deposition of ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am from global fallout in soils from forest, grassland and arable land in Bavaria (FRG), *Journal of Environmental Radioactivity* 8:1-14; 1988.

Chester R, Nimmo M, Corcoran PA. Rainwater-aerosol trace metal relationship at Cap-Ferrat: a coastal site in the western Mediterranean. *Marine Chemistry* 58:293-312; 1997.

DeBortoli M, Gaglione P. Variability of washout ratio for some fallout radionuclides. In: Physical behavior of radioactive contaminants in the atmosphere. Proceeding of an International Atomic Energy Agency symposium. Vienna. 1974.

Hoffman FO, Bergström U, Gyllander C, Wilkens AB. Comparison of predictions from internationally recognized assessment models for the transfer of selected radionuclides through terrestrial food chains. *Nuclear Safety* 25:533-546; 1984.

Hölgge Z, Filgas R. Inventory of ^{238}Pu and $^{239+240}\text{Pu}$ in the soil of Czechoslovakia in 1990. *Journal of Environmental Radioactivity* 27:181-189; 1995.

International Atomic Energy Agency. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments. Produced in collaboration with the International Union of Radioecologists. Vienna. International Atomic Energy Agency, technical reports series 364. 1994.

Izrael YA, Radioactive fallout after nuclear explosions and accidents. Baxter MS Series Editor « Radioactivity in the Environment » for Elsevier Publication. 281p. 2002.

- Kendall R, Peterson C. An empirical model for estimating world-wide deposition from atmospheric nuclear detonations. *Health Phys* 18:357-378; 1970.
- Meek ME and Rider BF, Compilation of fission product yield. Vallecitos Nuclear Center, Pleasanton, Calif., NEDO-12154-1. 1974 edition.
- Mitchell PI, Sanchez-Cabeza JA, Ryan TP, McGarry AT, Vidal-Quatras A. Preliminary estimates of cumulative caesium and plutonium deposition in the Irish terrestrial environment. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Article 138:241-256; 1990.
- Müller H, Pröhl G. ECOSYS-87: A dynamic model for the assessing radiological consequences of nuclear accidents. *Health Phys* 64:232-252; 1993.
- National Cancer Institute, Human Services Centers for Diseases Control and Prevention. Health Consequences to the American population of nuclear weapons tests conducted by the United States. A report prepared for the U.S. Congress. 2001.
- National Radiological Protection Board. Atmospheric Dispersion Modelling Liaison Committee. Review of deposition velocity and washout coefficient. National Radiological Protection Board technical Report NRPB-R322. 2001.
- Peckar M. Regional models LPMOD and ASIMD algorithms, parameterization and results of application to Pb and Cd in Europe scale. Co-operative Program for Monitoring and evaluation of the long range transmission of air-pollutants in Europe. EMEP/MSC-E Report 9/96. 1996.
- Renaud P, Réal J, Maubert H, Roussel-Debet S. Dynamic modeling of the cesium, strontium and ruthenium transfer to grass and vegetables. *Health Phys* 76:495-501; 1999.
- Renaud P, Louvat D. Magnitude of fission product deposition from atmospheric nuclear test fallout in France. To be published in *Health Phys*, 2004.
- Sehmel GA. Particles and gas dry deposition: a review. *Atmospheric Environment* 14:983-1011; 1980.
- Service Central de protection contre les Rayonnements Ionisants. Bulletins mensuels de résultats de mesures. République Française, Ministère de la Santé. 1961-1978. (in french)
- United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Report of the General Assembly. New York. United Nation Publication. 1982.
- United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Report of the General Assembly. New York. United Nation Publication. 2000.
- US Nuclear Regulatory Commission and Commission of European Communities. Probabilistic Accident Consequences Uncertainty Analysis. Food Chain uncertainty assessment. Vol 1 and 2. NUREG/CR-6523, EUR 16771. 1997.

Chine							
<i>Date</i>	<i>Type de test</i>	<i>Rendement (Mt)^a</i>			<i>Répartition du rendement (Mt)</i>		
		<i>Fission</i>	<i>Fusion</i>	<i>Total</i>	<i>Local et regional</i>	<i>Troposphere</i>	<i>Stratosphere</i>
Site : Lop Nor							
16/10/1964	Surface du sol	0.02	0	0.02	0.01	0.01	
17/06/1964	Air	1.7	1.3	3			1.7
14/05/1965	Air	0.04	0	0.04		0.037	0.003
09/05/1966	Air	0.2	0.1	0.3		0.11	0.09
27/10/1966	Air	0.02	0	0.02		0.02	
28/12/1966	Surface du sol	0.2	0.1	0.3	0.10	0.056	0.044
24/12/1967	Air	0.02	0	0.02		0.02	
28/12/1968	Air	1.5	1.5	3			1.5
29/09/1969	Air	1.9	1.1	3			1.9
14/10/1970	Air	1.9	1.1	3			1.9
18/11/1971	Surface du sol	0.02	0	0.02	0.01	0.01	
07/01/1972	Air	0.02	0	0.02		0.02	
18/03/1972	Air	0.1	0	0.1		0.08	0.02
27/06/1973	Air	1.4	1.1	2.5			1.4
17/06/1974	Air	0.3	0.3	0.6		0.065	0.235
23/01/1976	Surface du sol	0.02	0	0.02	0.01	0.01	
26/09/1976	Air	0.1	0	0.1		0.08	0.02
17/11/1976	Air	2.2	1.8	4			2.2
17/09/1977	Air	0.02	0	0.02		0.02	
15/03/1978	Surface du sol	0.02	0	0.02	0.01	0.01	
14/12/1978	Surface du sol	0.02	0	0.02	0.01	0.01	
16/10/1980	Air	0.5	0.1	0.6		0.11	0.39

France							
Date	Type de test	Rendement (Mt) ^a			Répartition du rendement (Mt)		
		Fission	Fusion	Total	Local et regional	Troposphere	Stratosphere
Site : Algeria							
13/02/1960	Tour	0.067 ^b	0	0.067	0.0335	0.0326	0.0009
01/04/1960	Surface du sol	0.003 ^b	0	0.003	0.0015	0.0015	
27/12/1960	Tour	0.002 ^b	0	0.002	0.001	0.001	
25/04/1961	Tour	0.0007 ^b	0	0.0007	0.00035	0.00035	
Site : Fangataufa							
24/09/1966	Barge	0.125 ^b	0	0.125	0.0625	0.0595	0.003
24/08/1968	Ballon	1.3	1.3	2.6			1.3
30/05/1970	Ballon	0.4725	0.4725	0.945			0.4725
03/08/1970	Ballon	0.072	0	0.072		0.07	0.002
Site : Mururoa							
02/07/1966	Barge	0.028 ^b	0	0.028	0.014	0.014	
19/07/1966	Largage	0.05 ^b	0	0.05		0.049	0.001
11/09/1966	Ballon	0.11 ^b	0	0.11			0.11
04/10/1966	Barge	0.205 ^b	0	0.205	0.1025	0.0921	0.0104
05/06/1967	Ballon	0.015 ^b	0	0.015		0.015	
27/06/1967	Ballon	0.12 ^b	0	0.12			0.12
02/07/1967	Barge	0.022 ^b	0	0.022	0.011	0.011	
07/07/1968	Ballon	0.115 ^b	0	0.115			0.115
15/07/1968	Ballon	0.45 ^b	0	0.45			0.45
03/08/1968	Ballon	0.15 ^b	0	0.15			0.15
08/09/1968	Ballon	0.64	0.64	1.28			0.64
15/05/1970	Ballon	0.013 ^b	0	0.013		0.013	
22/05/1970	Ballon	0.150	0.074	0.224			0.150
24/06/1970	Ballon	0.012 ^b	0	0.012		0.012	
03/07/1970	Ballon	0.457	0.457	0.914			0.457
27/07/1970	Ballon	0.00005 ^b	0	0.00005		0.00005	
06/08/1970	Ballon	0.297	0.297	0.594			0.297
05/06/1971	Ballon	0.034 ^b	0	0.034		0.034	
12/06/1971	Ballon	0.29	0.15	0.44			0.29
04/07/1971	Ballon	0.009 ^b	0	0.009		0.009	
08/08/1971	Ballon	0.004 ^b	0	0.004		0.004	
14/08/1971	Ballon	0.478	0.477	0.955			0.478
25/06/1972	Ballon	0.0005 ^b	0	0.0005		0.0005	
30/06/1972	Ballon	0.004 ^b	0	0.004		0.004	
27/07/1972	Ballon	0.006 ^b	0	0.006		0.006	
21/07/1973	Ballon	0.011 ^b	0	0.011		0.011	
28/07/1973	Ballon	0.00005 ^b	0	0.00005		0.00005	
18/08/1973	Ballon	0.004 ^b	0	0.004		0.004	
24/08/1973	Ballon	0.0002 ^b	0	0.0002		0.0002	
28/08/1973	Largage	0.006 ^b	0	0.006		0.006	
16/06/1974	Ballon	0.004 ^b	0	0.004		0.004	
07/07/1974	Ballon	0.10	0.05	0.15			0.10
17/07/1974	Ballon	0.004 ^b	0	0.004		0.004	
25/07/1974	Largage	0.008 ^b	0	0.008		0.008	
15/08/1974	Ballon	0.096	0	0.096		0.093	0.003
25/08/1974	Ballon	0.014 ^b	0	0.014		0.014	
14/09/1974	Ballon	0.221	0.111	0.332			0.221

Royaume Uni							
Date	Type de test	Rendement (Mt) ^a			Répartition du rendement (Mt)		
		Fission	Fusion	Total	Local et regional	Troposphere	Stratosphere
Test site : Monte Bello Islands, Australia							
03/10/1952	Barge	0.025	0	0.025	0.0125	0.0125	
16/05/1956	Tour (31 m)	0.015	0	0.015	0.0075	0.0075	
19/06/1956	Tour (31 m)	0.06	0	0.06	0.03	0.0293	0.0007
Test site : Emu, Australia							
14/10/1953	Tour (31 m)	0.01	0	0.01	0.005	0.005	
26/10/1953	Tour (31 m)	0.008	0	0.008	0.004	0.004	
Site : Maralinga, Australia							
27/09/1956	Tour (31 m)	0.015	0	0.015	0.0075	0.0075	
04/10/1956	Surface du sol	0.0015	0	0.0015	0.00075	0.00075	
11/10/1956	Largage (150 m)	0.003	0	0.003		0.003	
22/10/1956	Tour (31 m)	0.01	0	0.01	0.005	0.005	
14/09/1957	Tour (31 m)	0.001	0	0.001	0.0005	0.0005	
25/09/1957	Tour (31 m)	0.006	0	0.006	0.003	0.003	
09/10/1957	Ballon (300 m)	0.025	0	0.025		0.025	
Site : Malden Island, Pacific							
15/05/1957	Explosion aérienne	0.2	0.1	0.3		0.17	0.03
31/05/1957	Explosion aérienne	0.36	0.36	0.72		0.265	0.095
19/06/1957	Explosion aérienne	0.13	0.07	0.20		0.12	0.01
Site : Christmas Island, Pacific							
08/11/1957	Explosion aérienne	0.9	0.9	1.8		0.315	0.585
28/04/1958	Explosion aérienne	1.5	1.5	3		0.12	1.38
22/08/1958	Explosion aérienne	0.024	0	0.024		0.024	
02/09/1958	Explosion aérienne	0.5	0.5	1		0.325	0.175
11/09/1958	Explosion aérienne	0.4	0.4	0.8		0.285	0.115
23/09/1958	Explosion aérienne	0.025	0	0.025		0.025	

USA							
Date	Type de test	Rendement (Mt) ^a			Répartition du rendement (Mt)		
		Fission	Fusion	Total	Local et regional	Troposphere	Stratosphere
Test site : New Mexico							
16/07/1945	Tour	0.021	0	0.021	0.011	0.01	
Hiroshima and Nagasaki, Japan (combat use)							
05/08/1945	Largage	0.015	0	0.015		0.015	
09/08/1945	Largage	0.021	0	0.021		0.021	
Test site : Nevada							
27/01/1951	Largage (330 m)	0.001	0	0.001		0.001	
28/01/1951	Largage (330 m)	0.008	0	0.008		0.008	
01/02/1951	Largage (330 m)	0.001	0	0.001		0.001	
02/02/1951	Largage (330 m)	0.008	0	0.008		0.008	
06/02/1951	Largage (330 m)	0.022	0	0.022		0.022	
22/10/1951	Tour (100 m)	0.0001	0	0.0001	0.00005	0.00005	
28/10/1951	Largage (330 m)	0.0035	0	0.0035		0.0035	
30/10/1951	Largage (440 m)	0.014	0	0.014		0.014	
01/11/1951	Largage (440 m)	0.021	0	0.021		0.021	
05/11/1951	Largage (900 m)	0.031	0	0.031		0.031	
19/11/1951	Surface	0.012	0	0.0012	0.0006	0.0006	
29/11/1951	Surface (-5 m)	0.001	0	0.001	0.0005	0.0005	
01/04/1952	Air drop (240 m)	0.001	0	0.001		0.001	
15/04/1952	Air drop (320 m)	0.001	0	0.001		0.001	
22/04/1952	Air drop (1050 m)	0.031	0	0.031		0.031	
01/05/1952	Air drop (300 m)	0.019	0	0.019		0.019	
07/05/1952	Tower (90 m)	0.012	0	0.012	0.006	0.006	
25/05/1952	Tower (90 m)	0.011	0	0.011	0.0055	0.0055	
01/06/1952	Tower (90 m)	0.015	0	0.015	0.0075	0.0075	
05/06/1952	Tower (90 m)	0.014	0	0.014	0.007	0.007	
17/03/1953	Tower (90 m)	0.016	0	0.016	0.008	0.008	
24/03/1953	Tower (90 m)	0.024	0	0.024	0.012	0.012	
31/03/1953	Tower (90 m)	0.0002	0	0.0002	0.0001	0.0001	
06/04/1953	Air drop (1835 m)	0.011	0	0.011		0.011	
11/04/1953	Tower (30 m)	0.0002	0	0.0002	0.0001	0.0001	
18/04/1953	Tower (90 m)	0.023	0	0.023	0.012	0.011	
25/04/1953	Tower (90 m)	0.043	0	0.043	0.022	0.021	
08/05/1953	Air drop (740 m)	0.027	0	0.027		0.027	
19/05/1953	Tower (90 m)	0.032	0	0.032	0.016	0.016	
25/05/1953	Airburst (160 m)	0.015	0	0.015		0.015	
04/06/1953	Air drop (400 m)	0.061	0	0.061		0.0595	0.0015
18/02/1955	Air drop (230 m)	0.001	0	0.001		0.001	
22/02/1955	Tower (90 m)	0.002	0	0.002	0.001	0.001	
01/03/1955	Tower (90 m)	0.007	0	0.007	0.0035	0.0035	
07/03/1955	Tower (150 m)	0.043	0	0.043	0.0215	0.0215	
12/03/1955	Tower (90 m)	0.004	0	0.004	0.002	0.002	
22/03/1955	Tower (150 m)	0.008	0	0.008	0.004	0.004	
29/03/1955	Tower (150 m)	0.014	0	0.014	0.007	0.007	
29/03/1955	Air drop (225 m)	0.003	0	0.003		0.003	
06/04/1955	Air drop (1120 m)	0.003	0	0.003		0.003	
09/04/1955	Tower (90 m)	0.002	0	0.002	0.001	0.001	
15/04/1955	Tower (120 m)	0.022	0	0.022	0.011	0.011	
05/05/1955	Tower (150 m)	0.029	0	0.029	0.0145	0.0145	
15/05/1955	Tower (1560 m)	0.028	0	0.028	0.014	0.014	

USA							
Date	Type de test	Rendement (Mt) ^a			Répartition du rendement (Mt)		
		Fission	Fusion	Total	Local et regional	Troposphere	Stratosphere
28/05/1957	Tower (150 m)	0.012	0	0.012	0.006	0.006	
28/05/1957	Tower (90 m)	0.00014	0	0.00014	0.00007	0.00007	
05/06/1957	Balloon (150 m)	0.0000005	0	0.0000005		0.0000005	
18/06/1957	Balloon (150 m)	0.01	0	0.01		0.01	
24/06/1957	Balloon (210 m)	0.037	0	0.037		0.037	
05/07/1957	Balloon (460 m)	0.074	0	0.074		0.072	0.002
15/07/1957	Tower (150 m)	0.017	0	0.017	0.0085	0.0085	
19/07/1957	Rocket (6100 m)	0.002	0	0.002		0.002	
24/07/1957	Tower (150 m)	0.01	0	0.01	0.005	0.005	
25/07/1957	Balloon (150 m)	0.0097	0	0.0097		0.0097	
07/08/1957	Balloon (460 m)	0.019	0	0.019		0.019	
18/08/1957	Tower (150 m)	0.017	0	0.017	0.0085	0.0085	
23/08/1957	Balloon (460 m)	0.011	0	0.011		0.011	
30/08/1957	Balloon (230 m)	0.0047	0	0.0047		0.0047	
31/08/1957	Tower (210 m)	0.044	0	0.044	0.022	0.022	
02/09/1957	Tower (150 m)	0.011	0	0.011	0.0055	0.0055	
06/09/1957	Balloon (150 m)	0.0002	0	0.0002		0.0002	
08/09/1957	Balloon (230 m)	0.001	0	0.001		0.001	
14/09/1957	Tower (150 m)	0.011	0	0.011	0.0055	0.0055	
16/09/1957	Balloon (460 m)	0.012	0	0.012		0.012	
23/09/1957	Tower (150 m)	0.019	0	0.019	0.0095	0.0095	
28/09/1957	Balloon (460 m)	0.012	0	0.012		0.012	
07/10/1957	Balloon (460 m)	0.008	0	0.008		0.008	
19/09/1958	Balloon (150 m)	0.000083	0	0.000083		0.000083	
29/09/1958	Balloon (460 m)	0.002	0	0.002		0.002	
10/10/1958	Tower (30 m)	0.000079	0	0.000079	0.00004	0.000039	
13/10/1958	Balloon (460 m)	0.0014	0	0.0014		0.0014	
15/10/1958	Tower (15 m)	0.0000012	0	0.0000012	0.0000006	0.0000006	
16/10/1958	Balloon (140 m)	0.000037	0	0.000037		0.000037	
18/10/1958	Tower (22 m)	0.00009	0	0.00009	0.000045	0.000045	
22/10/1958	Balloon (440 m)	0.006	0	0.006		0.006	
22/10/1958	Balloon (460 m)	0.00012	0	0.00012		0.00012	
22/10/1958	Balloon (150 m)	0.00019	0	0.00019		0.00019	
26/10/1958	Balloon (460 m)	0.0049	0	0.0049		0.0049	
26/10/1958	Balloon (460 m)	0.0022	0	0.0022		0.0022	
29/10/1958	Tower (10 m)	0.0000078	0	0.0000078	0.0000039	0.0000039	
29/10/1958	Tower	0	0	0	0	0	
30/10/1958	Balloon (460 m)	0.0013	0	0.0013		0.0013	
11/07/1962	Surface (- 1 m)	0.0005	0	0.0005	0.00025	0.00025	
07/07/1962	Surface	0.02	0	0.02c	0.01	0.01	
14/07/1962	Tower	0.02	0	0.02c	0.01	0.01	
17/07/1962	Surface	0.02	0	0.02c	0.01	0.01	
Test site : Bikini, Pacific							
30/06/1946	Air drop	0.021	0	0.021		0.021	
24/07/1946	Underwater (- 30 m)	0.021	0	0.021	0.011	0.01	
28/02/1954	Surface	9 ^u	6	151	4.5		4.5
26/03/1954	Barge	7.3 ^u	3.7	11	3.65		3.65
06/04/1954	Surface	0.075	0.035	0.11	0.037	0.037	0.001
25/04/1954	Barge	4.6 ^u	2.3	6.9	2.3		2.3
04/05/1954	Barge	9.0 ^u	4.5	13.5	4.5		4.5
20/05/1956	Air drop	1.6 ^u	2.2	3.8		0.076	1.52
27/05/1956	Surface	1.25 ^u	2.25	3.5	0.625	0.038	0.587
11/06/1956	Barge	0.183 ^u	0.182	0.365	0.092	0.077	0.014
25/06/1956	Barge	0.55	0.55	1.1	0.275	0.168	0.107
10/07/1956	Barge	1.5 ^u	3.0	4.5	0.75	0.018	0.732
20/07/1956	Barge	2.3 ^u	2.7	5	1.15	0.005	1.145

Date	Type de test	Rendement (Mt) ^a			Répartition du rendement (Mt)		
		Fission	Fusion	Total	Local et regional	Troposphere	Stratosphere
Site : Bikini, Pacific (Suite)							
11/05/1958	Barge	0.68	0.68	1.36	0.34	0.175	0.165
21/05/1958	Barge	0.0251	0	0.0251	0.0126	0.0125	
31/05/1958	Barge	0.092	0	0.092	0.046	0.0446	0.0014
10/06/1958	Barge	0.142	0.071	0.213	0.071	0.063	0.008
14/06/1958	Barge	0.212	0.107	0.319	0.106	0.091	0.015
27/06/1958	Barge	0.275	0.137	0.412	0.137	0.164	0.024
29/06/1958	Barge	0.014	0	0.014	0.007	0.007	
02/07/1958	Barge	0.15	0.07	0.22	0.075	0.076	
12/07/1958	Barge	3.2 ^b	6.1	9.3	1.6		1.6
22/07/1958	Barge	0.065	0	0.065	0.0325	0.0316	0.0009
Test site : Enewetak, Pacific							
14/04/1948	Tower	0.037	0	0.037	0.019	0.018	
30/04/1948	Tower	0.049	0	0.049	0.025	0.024	
14/05/1948	Tower	0.018	0	0.018	0.009	0.009	
07/04/1951	Tower	0.081	0	0.081	0.041	0.039	0.001
20/04/1951	Tower	0.047	0	0.047	0.024	0.023	
08/05/1951	Tower	0.15	0.075	0.225	0.075	0.066	0.009
24/05/1951	Tower	0.0455	0	0.0455	0.0228	0.0227	
31/10/1952	Surface	5.7 ^b	4.7	10.4	2.85		2.85
15/11/1952	Air drop	0.25	0.25	0.5		0.2	0.05
13/05/1954	Barge	0.845	0.845	1.69	0.423	0.164	0.258
04/05/1956	Surface	0.04	0	0.04	0.02	0.02	
27/05/1956	Tower	0.00019	0	0.00019	0.000095	0.000095	
30/05/1956	Tower	0.0149	0	0.0149	0.00745	0.00745	
06/06/1956	Surface	0.0137	0	0.0137	0.00685	0.00685	
11/06/1956	Tower	0.008	0	0.008	0.004	0.004	
13/06/1956	Tower	0.00149	0	0.00149	0.000745	0.000745	
16/06/1956	Air drop	0.0017	0	0.0017		0.0017	
21/06/1956	Tower	0.0152	0	0.0152	0.0076	0.0076	
02/07/1956	Tower	0.24	0.12	0.36	0.12	0.10	0.020
08/07/1956	Barge	0.925	0.925	1.85	0.463	0.153	0.309
21/07/1956	Barge	0.167	0.083	0.25	0.084	0.074	0.009
05/05/1958	Surface	0.018	0	0.018	0.009	0.009	
11/05/1958	Barge	0.081	0	0.081	0.041	0.0388	0.0012
12/05/1958	Surface	0.685	0.685	1.37	0.343	0.175	0.167
16/05/1958	Under water	0.009	0	0.009	0.0045	0.0045	
20/05/1958	Barge	0.0059	0	0.0059	0.003	0.0029	
26/05/1958	Barge	0.22	0.11	0.33	0.11	0.094	0.016
26/05/1958	Barge	0.057	0	0.057	0.0285	0.0278	0.0007
30/05/1958	Barge	0.0116	0	0.0116	0.0058	0.0058	
02/07/1958	Barge	0.015	0	0.015	0.0075	0.0075	
08/06/1958	Under water	0.008	0	0.008	0.004	0.004	
14/06/1958	Barge	0.725	0.725	1.45	0.363	0.174	0.188
18/06/1958	Barge	0.011	0	0.011	0.0055	0.0055	
27/06/1958	Barge	0.44	0.44	0.88	0.22	0.151	0.069
28/06/1958	Barge	3 ^b	5.9	8.9	1.5		1.5
01/07/1958	Barge	0.0052	0	0.0052	0.0026	0.0026	
05/07/1958	Barge	0.265	0.132	0.397	0.133	0.109	0.024
17/07/1958	Barge	0.170	0.085	0.255	0.085	0.074	0.011
22/07/1958	Barge	0.135	0.067	0.202	0.067	0.060	0.007
26/07/1958	Barge	1	1	2	0.5	0.138	0.363
06/08/1958	Surface	0	0	0	0	0	
18/08/1958	Surface	0.00002	0	0.00002	0.00001	0.00001	
Site : Pacific							
14/05/1955	Under water	0.03	0	0.03	0.015	0.015	
28/04/1958	Balloon	0.0017	0	0.0017		0.0017	
05/05/1962	Rocket	0.05	0	0.05c			0.05
11/05/1962	Under water	0.02	0	0.02c	0.01	0.01	

Date	Type de test	Rendement (Mt) ^a			Répartition du rendement (Mt)		
		Fission	Fusion	Total	Local et regional	Troposphere	Stratosphere
Site : Atlantic, 38° - 50°S							
27/08/1958	Rocket	0.0015	0	0.0015			0.0015
30/08/1958	Rocket	0.0015	0	0.0015			0.0015
06/09/1958	Rocket	0.0015	0	0.0015			0.0015
Site : Johnston Island, Pacific							
01/08/1958	Rocket	1.9	1.9	3.8			1.9
12/08/1958	Rocket	1.9	1.9	3.8			1.9
09/07/1962	Rocket	0.7	0.7	1.4			0.7
02/10/1962	Air drop	0.075	0	0.075		0.073	0.002
06/10/1962	Air drop	0.0113	0	0.0113		0.0113	
18/10/1962	Air drop	0.795	0.795	1.59		0.341	0.454
20/10/1962	Rocket	0.02	0	0.02c			0.02
26/10/1962	Rocket	0.25	0.25	0.5c			0.25
27/10/1962	Air drop	0.4	0.4	0.8		0.285	0.115
30/10/1962	Air drop	4.15	4.15	8.3			4.15
01/11/1962	Rocket	0.25	0.25	0.5c			0.25
04/11/1962	Rocket	0.02	0	0.02c			0.02
Site : Christmas Island, Pacific							
25/04/1962	Air drop	0.127	0.063	0.19		0.114	0.014
27/04/1962	Air drop	0.27	0.14	0.41		0.226	0.047
02/05/1962	Air drop	0.545	0.545	1.09		0.336	0.209
04/05/1962	Air drop	0.335	0.335	0.67		0.252	0.083
08/05/1962	Air drop	0.1	0	0.1		0.097	0.003
09/05/1962	Air drop	0.1	0	0.1		0.097	0.003
11/05/1962	Air drop	0.05	0	0.05		0.049	0.001
12/05/1962	Air drop	0.25	0.25	0.5		0.2	0.05
14/05/1962	Air drop	0.097	0	0.097		0.094	0.003
19/05/1962	Air drop	0.073	0	0.073		0.071	0.002
25/05/1962	Air drop	0.0026	0	0.0026		0.0026	
27/05/1962	Air drop	0.043	0	0.043		0.043	
08/06/1962	Air drop	0.391	0.391	0.782		0.281	0.110
09/06/1962	Air drop	0.14	0.07	0.21		0.124	0.016
10/06/1962	Air drop	1.5	1.5	3		0.12	1.38
12/06/1962	Air drop	0.6	0.6	1.2		0.345	0.255
15/06/1962	Air drop	0.4	0.4	0.8		0.28	0.12
17/06/1962	Air drop	0.052	0	0.052		0.051	0.001
19/06/1962	Air drop	0.0022	0	0.0022		0.0022	
22/06/1962	Air drop	0.0815	0	0.0815		0.0791	0.0024
27/06/1962	Air drop	3.83	3.82	7.65			3.83
30/06/1962	Air drop	0.63	0.64	1.27		0.346	0.284
10/07/1962	Air drop	0.5	0.5	1		0.325	0.175
11/07/1962	Air drop	1.94	1.94	3.88		0.089	1.851

Date	Type de test	Rendement (Mt) ^a			Répartition du rendement (Mt)		
		Fission	Fusion	Total	Local et régional	Troposphere	Stratosphere
Site : Semipalatinsk							
29/08/1949	Surface	0.022	0	0.022	0.011	0.011	
24/09/1951	Surface	0.038	0	0.038	0.019	0.018	0.001
18/10/1951	Air	0.042	0	0.042		0.039	0.003
12/08/1953	Surface	0.04	0.36	0.4e	0.02	0.0089	0.011
23/08/1953	Air	0.028	0	0.028		0.028	
03/09/1953	Air	0.0058	0	0.0058		0.0058	
08/09/1953	Air	0.0016	0	0.0016		0.0016	
10/09/1953	Air	0.0049	0	0.0049		0.0049	
29/09/1954	Air	0.0002	0	0.0002		0.0002	
01/10/1954	Air	0.00003	0	0.00003		0.00003	
03/10/1954	Air	0.002	0	0.002		0.002	
05/10/1954	Surface	0.004	0	0.004	0.002	0.002	
08/10/1954	Air	0.0008	0	0.0008		0.0008	
19/10/1954	Surface	0.000001	0	0.000001	0.0000005	0.0000005	
23/10/1954	Air	0.062	0	0.062		0.054	0.008
26/10/1954	Air	0.0028	0	0.0028		0.0028	
20/10/1954	Surface	0.01	0	0.01	0.005	0.005	
29/07/1955	Surface	0.0013	0	0.0013	0.00065	0.00065	
02/08/1955	Surface	0.012	0	0.012	0.006	0.006	
05/08/1955	Surface	0.0012	0	0.0012	0.0006	0.0006	
06/11/1955	Air	0.167	0.083	0.25		0.106	0.061
22/11/1955	Air	0.8	0.8	1.6		0.003	0.797
16/03/1956	Surface	0.014	0	0.014	0.007	0.007	
25/03/1956	Surface	0.0055	0	0.0055	0.00275	0.00275	
24/08/1956	Surface	0.027	0	0.027	0.0135	0.0135	
30/08/1956	Air	0.45	0.45	0.9		0.020	0.430
02/09/1956	Air	0.051	0	0.051		0.046	0.005
10/09/1956	Air	0.038	0	0.038		0.036	0.002
17/11/1956	Air	0.45	0.45	0.9		0.020	0.430
14/12/1956	Air	0.04	0	0.04		0.037	0.003
08/03/1957	Air	0.019	0	0.019		0.019	
03/04/1957	Air	0.042	0	0.042		0.039	0.003
06/04/1957	Air	0.057	0	0.057		0.050	0.007
10/04/1957	High atmosphere	0.34	0.34	0.68			0.34
12/04/1957	Air	0.022	0	0.022		0.022	
16/04/1957	Air	0.213	0.107	0.32		0.115	0.098
22/08/1957	Air	0.26	0.26	0.52		0.078	0.182
26/08/1957	Air	0.0001	0	0.0001		0.0001	
13/09/1957	Air	0.0059	0	0.0059		0.0059	
26/09/1957	Air	0.013	0	0.013		0.013	
28/12/1957	Air	0.012	0	0.012		0.012	
04/01/1958	Air	0.0013	0	0.0013		0.0013	
17/01/1958	Air	0.0005	0	0.0005		0.0005	
13/03/1958	Air	0.0012	0	0.0012		0.0012	
14/03/1958	Air	0.035	0	0.035		0.033	0.002
15/03/1958	High atmosphere	0.014	0	0.014			0.014
18/03/1958	Air	0.00016	0	0.00016		0.00016	
20/03/1958	High atmosphere	0.012	0	0.012			0.012
22/03/1958	Air	0.018	0	0.018		0.018	
01/09/1961	Air	0.016	0	0.016		0.016	
04/09/1961	Air	0.009	0	0.009		0.009	
05/09/1961	Air	0.016	0	0.016		0.016	
06/09/1961	Air	0.0011	0	0.0011		0.0011	
09/09/1961	Surface	0.00038	0	0.00038	0.00019	0.00019	
10/09/1961	Air	0.00088	0	0.00088		0.00088	
11/09/1961	Air	0.0003	0	0.0003		0.0003	
13/09/1961	Air	0.004	0	0.004f		0.004	
14/09/1961	Surface	0.0004	0	0.0004	0.0002	0.0002	
17/09/1961	Air	0.04	0	0.04f		0.037	
18/09/1961	Surface	0.000004	0	0.000004	0.000002	0.000002	

Date	Type de test	Rendement (Mt) ^a			Répartition du rendement (Mt)		
		Fission	Fusion	Total	Local et regional	Troposphere	Stratosphere
Site : Semipalatinsk (Suite)							
18/09/1961	Air	0.00075	0	0.00075		0.00075	
19/09/1961	Surface	0.00003	0	0.00003	0.000015	0.000015	
20/09/1961	Air	0.0048	0	0.0048		0.0048	
21/09/1961	Air	0.0008	0	0.0008		0.0008	
26/09/1961	Air	0.0012	0	0.0012		0.0012	
01/10/1961	Air	0.003	0	0.003		0.003	
04/10/1961	Air	0.013	0	0.013		0.013	
12/10/1961	Air	0.015	0	0.015		0.015	
17/10/1961	Air	0.0066	0	0.0066		0.0066	
19/10/1961	Air	0.004	0	0.004e		0.004	
25/10/1961	Air	0.0005	0	0.0005		0.0005	0.003
30/10/1961	Air	0.00009	0	0.00009		0.00009	
01/11/1961	Air	0.0027	0	0.0027		0.0027	
02/11/1961	Air	0.0006	0	0.0006		0.0006	
03/11/1961	Surface	0.000001	0	0.000001	0.0000005	0.0000005	
03/11/1961	Air	0.0009	0	0.0009		0.0009	
04/11/1961	Surface	0.0002	0	0.0002	0.0001	0.0001	
01/08/1962	Air	0.0024	0	0.0024		0.0024	
03/08/1962	Air	0.0016	0	0.0016		0.0016	
04/08/1962	Air	0.0038	0	0.0038		0.0038	
07/08/1962	Surface	0.0099	0	0.0099	0.00495	0.00495	
18/08/1962	Air	0.0074	0	0.0074		0.0074	
18/08/1962	Air	0.0058	0	0.0058		0.0058	0.003
21/08/1962	Air	0.04	0	0.04e		0.037	0.003
22/08/1962	Air	0.003	0	0.003		0.003	
23/08/1962	Air	0.0025	0	0.0025		0.0025	
25/08/1962	Air	0.004	0	0.004e		0.004	
27/08/1962	Air	0.011	0	0.011		0.011	
31/08/1962	Air	0.0027	0	0.0027		0.0027	
22/09/1962	Surface	0.00021	0	0.00021	0.00011	0.0001	
24/09/1962	Air	0.0012	0	0.0012		0.0012	
25/09/1962	Surface	0.007	0	0.007	0.0035	0.0035	
28/09/1962	Air	0.0013	0	0.0013		0.0013	
09/10/1962	Air	0.008	0	0.008		0.008	
10/10/1962	Air	0.0092	0	0.0092		0.0092	
13/10/1962	Air	0.0049	0	0.0049		0.0049	
14/10/1962	Air	0.004	0	0.004e		0.004	
20/10/1962	Air	0.0067	0	0.0067		0.0067	
28/10/1962	Air	0.0078	0	0.0078		0.0078	
28/10/1962	Air	0.0078	0	0.0078		0.0078	
30/10/1962	Surface	0.0012	0	0.0012	0.0006	0.0006	
31/10/1962	Air	0.01	0	0.01		0.01	
01/11/1962	Air	0.003	0	0.003		0.003	
03/11/1962	Air	0.0047	0	0.0047		0.0047	
04/11/1962	Air	0.0084	0	0.0084		0.0084	
05/11/1962	Surface	0.0004	0	0.0004	0.0002	0.0002	
11/11/1962	Surface	0.0001	0	0.0001	0.00005	0.00005	
13/11/1962	Surface	0.000001	0	0.000001	0.0000005	0.0000005	
14/11/1962	Air	0.012	0	0.012		0.012	
17/11/1962	Air	0.018	0	0.018		0.018	
24/11/1962	Surface	0.000001	0	0.000001	0.0000005	0.0000005	
26/11/1962	Surface	0.000031	0	0.000031	0.000016	0.000015	
01/12/1962	Air	0.0024	0	0.0024		0.0024	
23/12/1962	Surface	0.000001	0	0.000001	0.0000005	0.0000005	
24/12/1962	Surface	0.000007	0	0.000007	0.00000035	0.00000035	
24/12/1962	Surface	0.000028	0	0.000028	0.000014	0.000014	

Date	Type de test	Rendement (Mt) ^a			Répartition du rendement (Mt)		
		Fission	Fusion	Total	Local et regional	Troposphere	Stratosphere
Site : Nouvelle Zemble							
21/09/1955	Under water	0.0035	0	0.0035	0.00175	0.00175	
07/09/1957	Surface	0.032	0	0.032	0.016	0.0154	0.0006
24/09/1957	Air	0.8	0.8	1.6		0.003	0.797
06/10/1957	Air	1.45	1.45	2.9			1.45
10/10/1957	Under water	0.01	0	0.01	0.005	0.005	
23/02/1958	Air	0.43	0.43	0.86		0.025	0.405
27/02/1958	Air	0.163	0.087	0.25		0.103	0.060
27/02/1958	Air	0.75	0.75	1.5		0.004	0.746
14/03/1958	Air	0.04	0	0.04		0.037	0.003
21/03/1958	Air	0.325	0.325	0.65		0.054	0.271
30/09/1958	Air	0.6	0.6	1.2		0.005	0.595
30/09/1958	Air	0.45	0.45	0.9		0.020	0.430
02/10/1958	Air	0.193	0.097	0.29		0.112	0.071
02/10/1958	Air	0.04	0	0.04		0.037	0.003
04/10/1958	Air	0.009	0	0.009		0.009	
05/10/1958	Air	0.015	0	0.015		0.015	
06/10/1958	Air	0.0055	0	0.0055		0.0055	
10/10/1958	Air	0.068	0	0.068		0.059	0.009
12/10/1958	Air	0.725	0.725	1.45		0.004	0.721
15/10/1958	Air	0.75	0.75	1.5		0.004	0.746
18/10/1958	Air	1.45	1.45	2.9			1.45
19/10/1958	Air	0.04	0	0.04		0.037	0.003
19/10/1958	Air	0.000001	0	0.000001		0.000001	
20/10/1958	Air	0.293	0.147	0.44		0.115	0.178
21/10/1958	Air	0.002	0	0.002		0.002	
22/10/1958	Air	1.4	1.4	2.8			1.4
24/10/1958	Air	0.5	0.5	1		0.005	0.495
25/10/1958	Air	0.127	0.063	0.19		0.090	0.037
25/10/1958	Air	0.0001	0	0.0001		0.0001	
10/09/1961	Air	1.35	1.35	2.7			1.35
10/09/1961	Air	0.012	0	0.012		0.012	
12/09/1961	Air	0.575	0.575	1.15		0.005	0.570
13/09/1961	Air	0.006	0	0.006		0.006	
14/09/1961	Air	0.6	0.6	1.2		0.005	0.595
16/09/1961	Air	0.415	0.415	0.83		0.029	0.386
18/09/1961	Air	0.5	0.5	1		0.005	0.495
20/09/1961	Air	0.266	0.134	0.4 ^e		0.118	0.148
22/09/1961	Air	0.173	0.087	0.26		0.107	0.066
02/10/1961	Air	0.167	0.083	0.25		0.106	0.061
04/10/1961	Air	2	2	4 ^e			2
06/10/1961	Air	2	2	4			2
08/10/1961	Air	0.015	0	0.015		0.015	
20/10/1961	Air	0.725	0.725	1.45		0.004	0.721
23/10/1961	Under water	0.0048	0	0.0048	0.0024	0.0024	
23/10/1961	Air	4.17	8.33	12.5			4.17
25/10/1961	Air	0.2	0.1	0.3		0.113	0.087
27/10/1961	Water surface	0.016	0	0.016	0.008	0.008	
30/10/1961	Air	1.5 ^e	48.5 ^e	50			1.5
31/10/1961	Air	2.5	2.5	5			2.5
31/10/1961	Air	0.267	0.133	0.4 ^e		0.118	0.149
02/11/1961	Air	0.08	0.04	0.12		0.063	0.017
02/11/1961	Air	0.187	0.093	0.28		0.111	0.076
04/11/1961	Air	0.015	0	0.015		0.015	
04/11/1961	Air	0.267	0.133	0.4 ^e		0.118	0.149
04/11/1961	Air	0.006	0	0.006		0.006	

Date	Type de test	Rendement (Mt) ^a			Répartition du rendement (Mt)		
		Fission	Fusion	Total	Local et regional	Troposphere	Stratosphere
Site : Nouvelle Zemble (Suite)							
05/08/1962	Air	7.03	14.07	21.1			7.03
10/08/1962	Air	0.267	0.133	0.4 ^f		0.118	0.149
20/08/1962	Air	1.4	1.4	2.8			1.4
22/08/1962	Air	0.8	0.8	1.6		0.003	0.797
22/08/1962	Water surface	0.006	0	0.006	0.003	0.003	
25/08/1962	Air	2	2	4 ^f			2
27/08/1962	Air	2.1	2.1	4.2			2.1
02/09/1962	Air	0.08	0	0.08		0.067	0.013
08/09/1962	Air	0.95	0.95	1.9		0.001	0.949
15/09/1962	Air	1.55	1.55	3.1			1.55
16/09/1962	Air	1.625	1.625	3.25			1.625
18/09/1962	Air	0.675	0.675	1.35		0.004	0.671
19/09/1962	Air	2	2	4 ^f			2
21/09/1962	Air	1.2	1.2	2.4			1.2
25/09/1962	Air	6.37	12.73	19.1			6.37
27/09/1962	Air	8.07	16.13	24.2 ^f			8.07
07/10/1962	Air	0.32	0	0.32		0.173	0.147
09/10/1962	Air	0.015	0	0.015		0.015	
22/10/1962	Air	4.1	4.1	8.2			4.1
27/10/1962	Air	0.173	0.087	0.26		0.107	0.066
29/10/1962	Air	0.24	0.12	0.36		0.118	0.122
30/10/1962	Air	0.187	0.093	0.28		0.111	0.076
01/11/1962	Air	0.16	0.08	0.24		0.104	0.056
03/11/1962	Air	0.26	0.13	0.39		0.119	0.141
03/11/1962	Air	0.045	0	0.045		0.041	0.004
18/12/1962	Air	0.073	0.037	0.11		0.058	0.015
18/12/1962	Air	0.069	0	0.069		0.059	0.010
20/12/1962	Air	0.0083	0	0.0083		0.0083	
22/12/1962	Air	0.0063	0	0.0063		0.0063	
23/12/1962	Air	0.287	0.143	0.43		0.117	0.170
23/12/1962	Air	0.0083	0	0.0083		0.0083	
23/12/1962	Air	0.0024	0	0.0024		0.0024	
24/12/1962	Air	0.55	0.55	1.1		0.005	0.545
24/12/1962	Air	8.07	16.13	24.2			8.07
25/12/1962	Air	1.55	1.55	3.1			1.55
25/12/1962	Air	0.0085	0	0.0085		0.0085	
Test site : Totsk, Aralsk							
14/09/1954	Air	0.04	0	0.04		0.037	0.003
02/02/1956	Surface	0.0003	0	0.0003	0.00015	0.00015	
Test site : Kapustin Yar							
19/01/1957	Air	0.01	0	0.01		0.01	
01/11/1958	Air	0.01	0	0.01		0.01	
03/11/1958	Air	0.01	0	0.01		0.01	
06/09/1961	Air	0.011	0	0.011		0.011	
06/10/1961	Air	0.04	0	0.04		0.037	0.003
27/10/1961	High atmosphere	0.0012	0	0.0012			0.0012
27/10/1961	High atmosphere	0.0012	0	0.0012			0.0012
22/10/1962	High atmosphere	0.2	0.1	0.3			0.2
28/10/1962	High atmosphere	0.2	0.1	0.3			0.2
01/11/1962	High atmosphere	0.2	0.1	0.3			0.2

a Estimated fission and fusion yields unless otherwise indicated ; reported total yields.

b Reported fission or fusion yield.

c Indefinite reported yield ; value assigned as follows : low, 0.02 Mt ; no indication, 0.05 Mt ; submegatonne, 0.5 Mt.

d from > 1 Mt events 1956 = 9 Mt (8 Mt from > 1 Mt events), 1957 - 1958 = 19 Mt (14 Mt from > 1 Mt events) [D7].

e Thermonuclear explosion ; fission yield estimated [G7].

f Indefinite reported yield ; value assigned as follows : 0.000001 - 0.02 Mt, 0.004 Mt ; 0.02 - 0.15 Mt, 0.04 Mt ; 0.15 - 1.5 Mt, 0.4 Mt ; 1.5 - 10 Mt, 4 Mt ; > 10 Mt, 24.2 Mt.

D e 1945 à 1980 : plus de 500 essais nucléaires atmosphériques

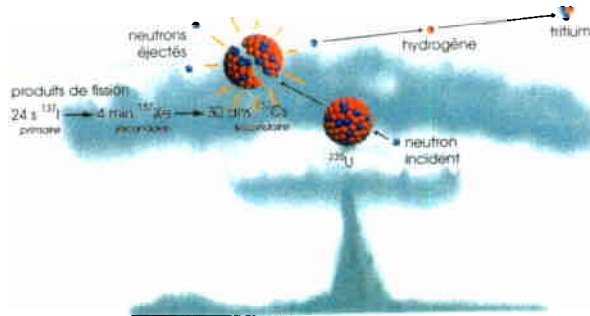
La puissance d'un essai est exprimée en tonnes d'explosif classique de type TNT (TriNitroToluène)

A titre d'exemple les explosions d'Hiroshima et Nagasaki étaient de 20 kt (20 000 tonnes) chacune.

De 1945 à 1980, plus de 500 essais nucléaires atmosphériques ont été réalisés par les Etats-Unis, la Russie, la Grande-Bretagne, la France et la Chine. Ils constituent à ce jour le seul apport massif de radionucléides à l'échelle planétaire, et la principale source de radioactivité artificielle dans l'environnement français.

Une explosion nucléaire entraîne un dégagement d'énergie considérable et la production de produits de fission et de produits d'activation, radioactifs.

Produits de fission
Sous l'impact d'un neutron, le noyau de l'atome d'uranium 235 ou de plutonium 239 se casse en deux radionucléides, libérant de l'énergie et des neutrons. 56 radionucléides « primaires » sont ainsi produits. En se désintégrant, ils vont engendrer plus de 200 radionucléides « secondaires ». Parmi les produits de fission : le césium 137, le strontium 90, le zirconium 95, l'iode 131, le baryum 40, les ruthéniums 103,106.



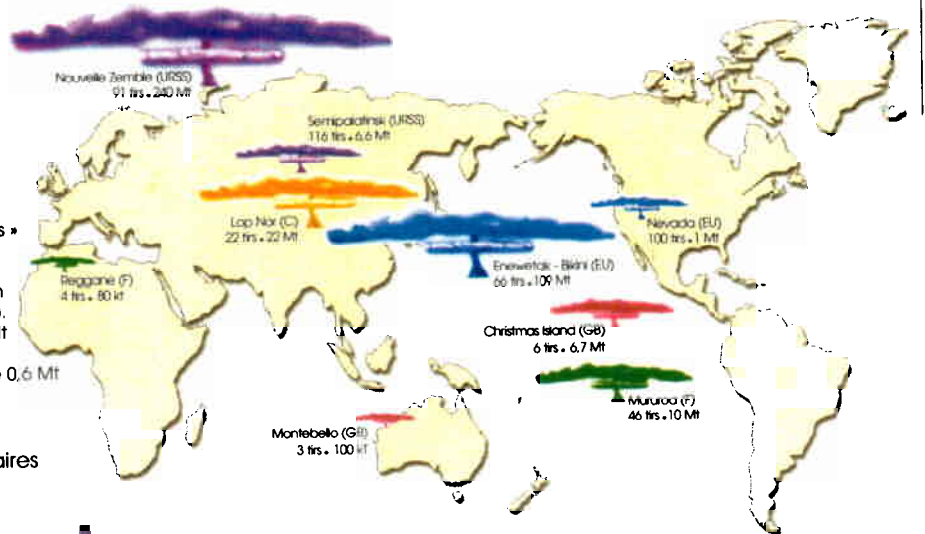
Produits d'activation
Certains noyaux présents dans l'environnement peuvent capturer des neutrons et devenir radioactifs, comme le tritium, le carbone 14, le manganèse 54. Dans cet exemple, l'hydrogène de l'air se transforme en tritium.

Localisation des essais nucléaires atmosphériques

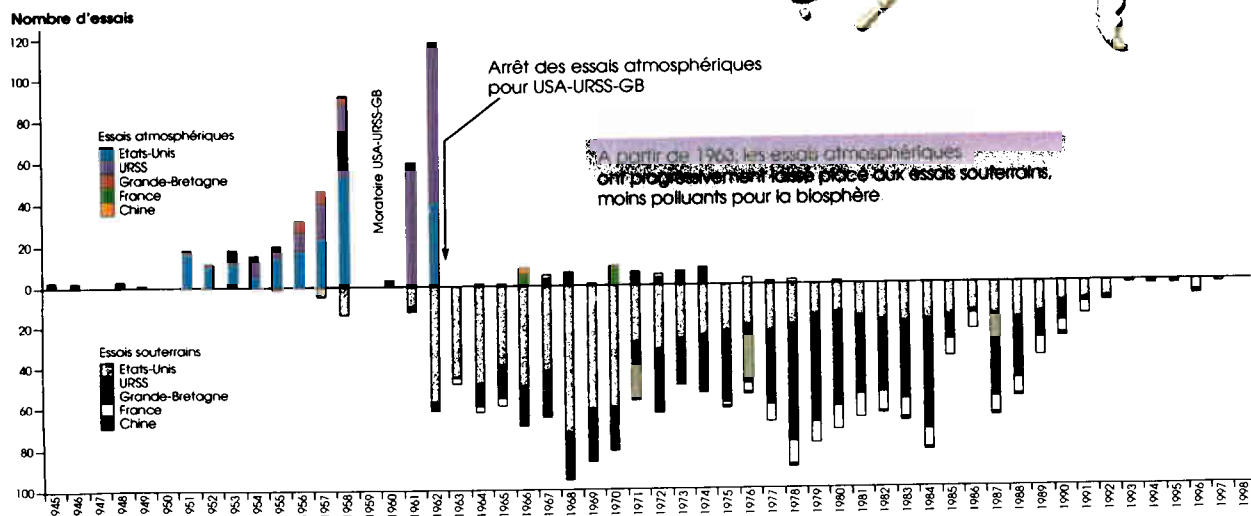
Chaque pays concerné a utilisé plusieurs sites d'essais, choisis pour leur isolement (sites désertiques, insulaires).

- Etats-Unis (EU)
- URSS
- Grande-Bretagne (GB)
- France (F)
- Chine (C)

Sur la carte, la taille des « champignons » est proportionnelle à la puissance des essais. Seuls les Etats-Unis et l'URSS ont effectué des tirs dépassant chacun 10 Mt (mégatonnes, millions de tonnes). Le tir russe du 30 octobre 1961 de 50 Mt a été le plus puissant. Le dernier tir atmosphérique chinois de 0,6 Mt a eu lieu le 18 octobre 1980.



Chronologie des essais nucléaires





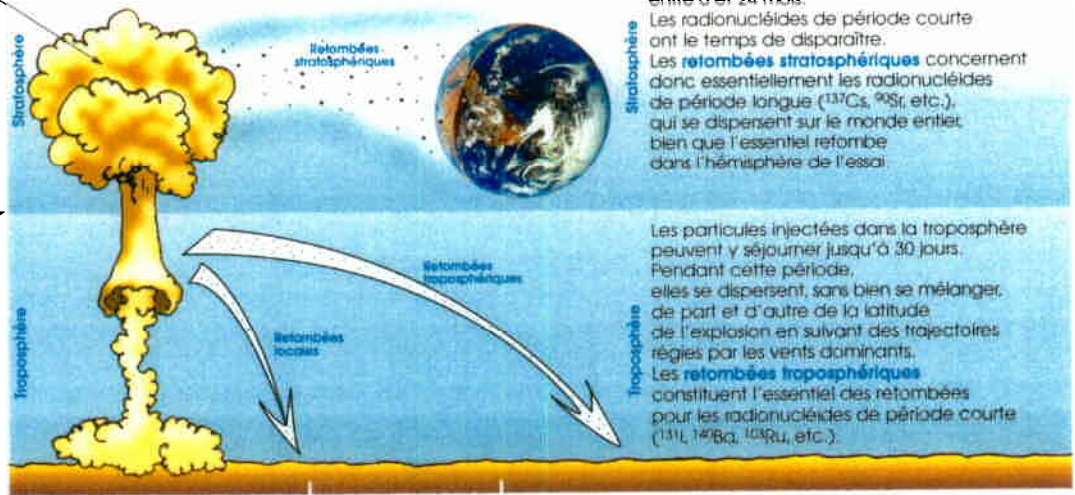
Les essais atmosphériques ont libéré d'importantes quantités de radionucléides qui sont retombés sur toute la surface du globe.

Ce sont principalement la puissance et la hauteur de l'explosion qui déterminent l'altitude atteinte par les particules radioactives dans l'atmosphère. Elles y séjournent de plusieurs jours à plusieurs mois avant de retomber.

Répartition des dépôts radioactifs : trois types de retombées

La tête du nuage pénètre la stratosphère quand la puissance dépasse 20 kt. Elle devient essentiellement stratosphérique à partir de 150 kt et atteint 25 km de hauteur au dessus de 1 Mt.

La stratosphère commence entre 10 km (régions polaires) et 17 km (équateur).



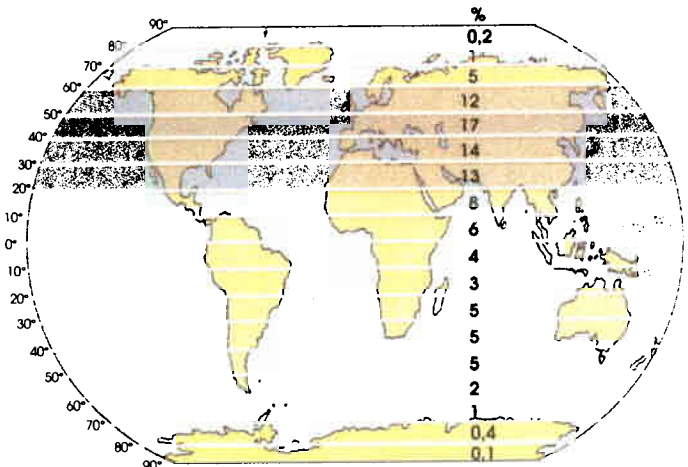
Distances au sol 100 km 1000 km
Les **retombées locales** concernent les débris les plus lourds qui se déposent dans un rayon de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres.

Progression du nuage radioactif troposphérique consécutif au tir chinois du 16 octobre 1980.



Le tir chinois du 16 octobre 1980 a eu lieu à Lop Nor à 40° de latitude nord. Le nuage de particules radioactives s'est déplacé au gré des vents dominants en restant essentiellement entre le 30° et le 50° de latitude. Il est passé au dessus de la France entre le 22 et le 23 octobre 1980. Les sites américain du Nevada (37°) et russe de Semipalatinsk (52°) sont situés à des latitudes voisines.

Répartition mondiale en % des retombées de strontium 90 (période de 28 ans), en fonction de la latitude.



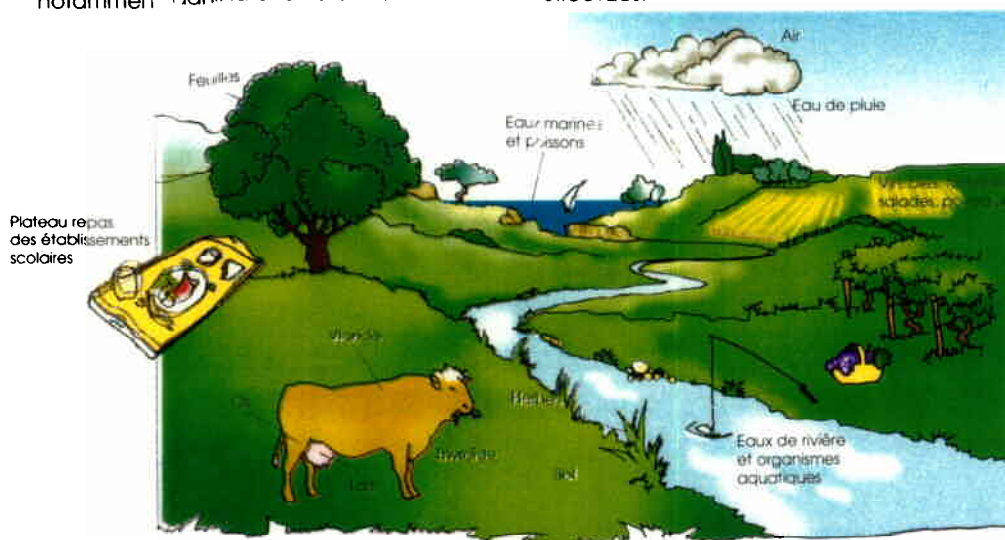
La plupart des explosions, et notamment les explosions russes et américaines ayant eu lieu dans l'hémisphère nord, c'est dans cet hémisphère que les retombées cumulées depuis 1945 ont été les plus importantes. La bande comprise entre le 40° et le 50° de latitude, où se trouve la France, a été la plus touchée.



France, la surveillance de l'environnement a commencé au début des années 1960.

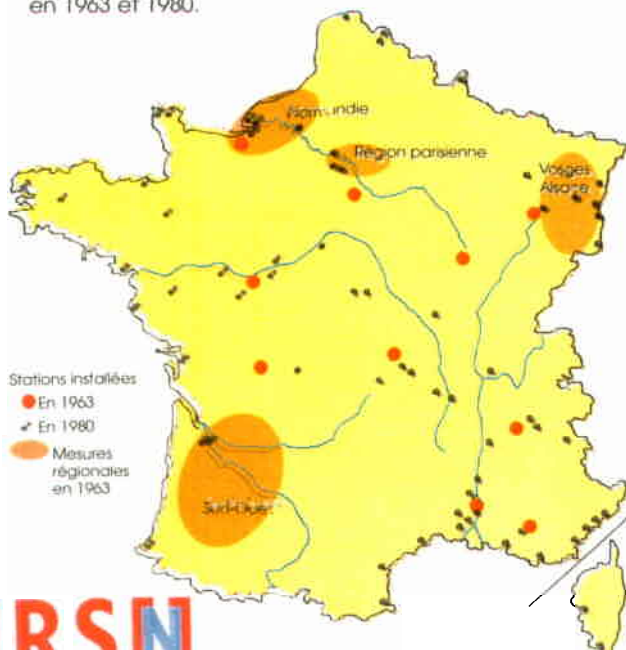
Dès 1961, les retombées radioactives consécutives aux essais atmosphériques ont été mesurées par le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI devenu aujourd'hui IRSN) et le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). La France a été l'un des premiers pays à mettre en place un réseau complet de surveillance de la radioactivité dans l'environnement.

Depuis 1961, des prélèvements de toutes natures, notamment dans la chaîne alimentaire ont été effectués.



Les mesures de radioactivité, effectuées par le SCPRI et le CEA dans l'environnement et plus particulièrement dans la chaîne alimentaire, ont donné lieu à des rapports mensuels publics.

Localisation des stations de mesure de radioactivité en 1963 et 1980.



Radionucléides déposés en France classés par période croissante

Radionucléide	Période
¹³¹ I	8 jours
¹⁴⁰ Ba	13 jours
¹³⁷ Cs	33 jours
¹⁰⁶ Ru	39 jours
⁹⁰ Sr	51 jours
¹¹⁰ Ag	69 jours
¹³² I	64 jours
¹⁴⁴ Ce	280 jours
²³⁸ Mn	310 jours
¹⁰⁶ Ru	370 jours
⁹⁹ Tc	2,7 ans
¹³⁷ Cs	2,8 ans
³ H	12 ans
²⁴¹ Pu	14 ans
¹³⁷ Cs	29 ans
¹³⁷ Cs	30 ans
¹⁴ C	5 700 ans
²³⁹ Pu	6 600 ans
²³⁹ Pu	24 000 ans

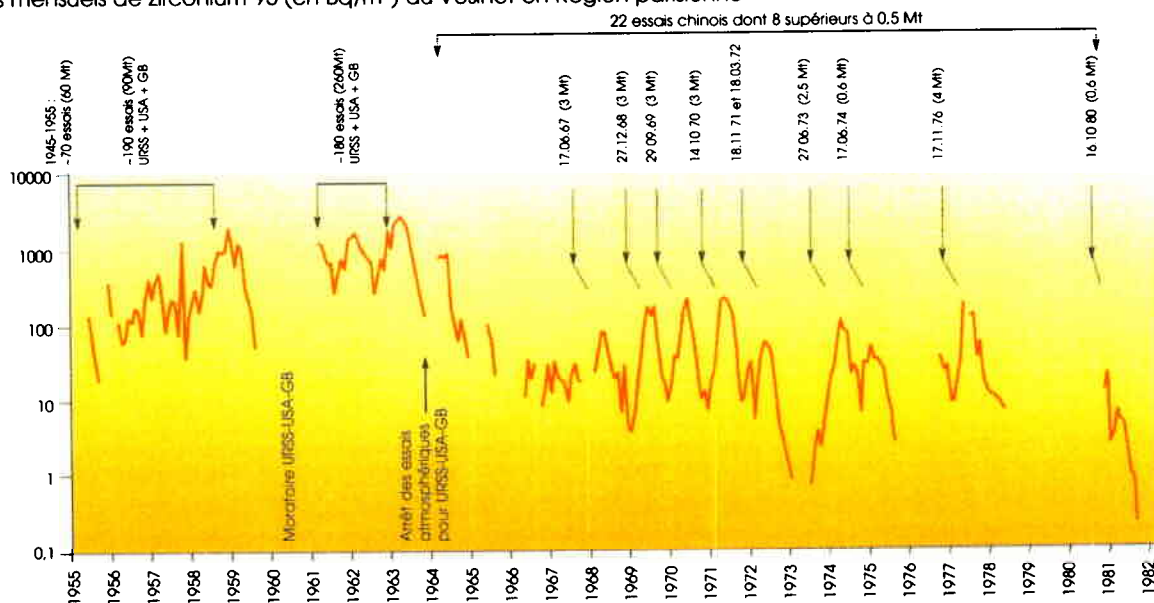
La plupart de ces radionucléides ont été mesurés plus ou moins régulièrement dans l'air, l'eau de pluie et les herbages. Les radionucléides les plus importants du point de vue de la protection de l'homme ont été les plus mesurés. C'est le cas du césium 137 et du strontium 90 dont les activités ont été suivies mensuellement dans toutes les composantes de l'environnement décrites ci-dessus.



retombées des essais ont été globalement homogènes en France métropolitaine

Les dépôts radioactifs les plus importants correspondent aux deux grandes périodes d'explosions : 1954-1958 et surtout 1961-1962. Après 1964, les pics de dépôts, 10 à 100 fois plus faibles, correspondent aux principales explosions chinoises.

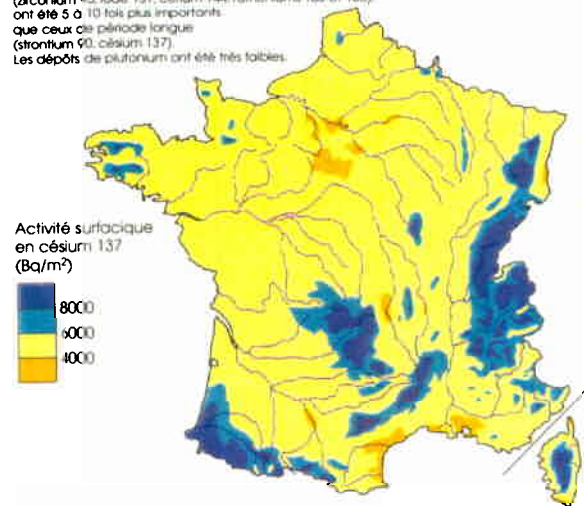
Dépôts mensuels de zirconium 95 (en Bq/m²) au Vésinet en Région parisienne



Par temps sec, les particules radioactives se déposent sous l'effet du vent et des turbulences de l'air qu'il entraîne. Lors de pluies, elles sont précipitées au sol par les gouttes d'eau. Les concentrations dans l'air (donc les dépôts effectués par temps sec) ont été très homogènes sur l'ensemble de la France métropolitaine. Toutefois les dépôts pluvieux, qui représentent souvent plus des 2/3 de l'ensemble des dépôts, ont conduit à des disparités régionales modérées.

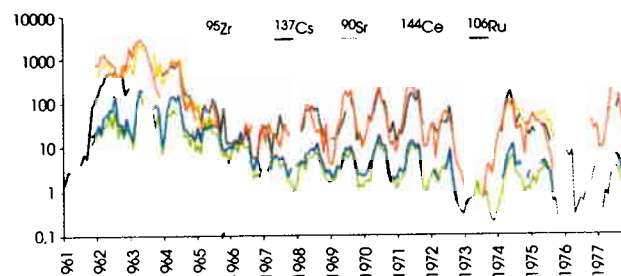
Ainsi, la carte des dépôts cumulés de césium 137, de 1945 à 1980, suit celle des précipitations moyennes annuelles.

Les dépôts de radionucléides de période courte, aujourd'hui disparus (zirconium 95, iode 131, césium 144, ruthéniums 103 et 106), ont été 5 à 10 fois plus importants que ceux de période longue (strontium 90, césium 137). Les dépôts de plutonium ont été très faibles.



Les dépôts cumulés inférieurs à 4000 Bq/m² correspondent à des zones de précipitations inférieures à 600 mm/an. Les dépôts cumulés supérieurs à 8000 Bq/m² correspondent à des zones de précipitations supérieures à 1300 mm/an.

Dépôts mensuels (en Bq/m²) au Vésinet en Région parisienne



Que reste-il des dépôts radioactifs aujourd'hui ?

Seuls les radionucléides de période longue subsistent : césium 137, strontium 90, plutoniums (238, 239, 240, 241 et son descendant l'américium 241).

Aujourd'hui encore, la majeure partie des activités de strontium 90 et de plutonium mesurées dans l'environnement français est imputable aux essais. En revanche, il est de plus en plus difficile de distinguer le césium 137 dû aux essais de celui déposé en mai 1986 à la suite de l'accident de Tchernobyl, excepté sur l'ouest de la France, peu touché par cet accident.

Sous l'effet conjugué de la décroissance radioactive et du lessivage des sols, les quantités de césium et de strontium ont significativement diminué. Aujourd'hui par exemple, les activités de césium 137 dues aux tirs sont partout inférieures à 3000 Bq/m².

Activités surfaciques actuelles, liées aux retombées des essais (en Bq/m²):

- ¹³⁷Cs < 3000
- ⁹⁰Sr < 2000
- ²³⁹Pu < 700
- ²⁴⁰Pu = 60
- ²⁴¹Am* = 20
- ²³⁸Pu = 2

* L'américium 241 mesuré dans les sols français provient de la désintégration du plutonium 241.