

IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE*Faire avancer la sûreté nucléaire*

Bilan de l'état radiologique de l'environnement français en 2012



Synthèse des résultats des réseaux
de surveillance de l'IRSN



SOMMAIRE

Avant-propos	p. 3
I La surveillance radiologique de l'environnement	p. 4
I.1 La radioactivité naturelle et artificielle en France	p. 6
I.2 Pourquoi surveiller la radioactivité dans l'environnement ?	p. 9
I.3 Comment surveille-t-on la radioactivité dans l'environnement ?	p. 13
I.4 Comment mesure-t-on la radioactivité ?	p. 24
II Les résultats de la surveillance du territoire français	p. 32
II.1 Introduction	p. 34
II.2 Le débit de dose gamma ambiant	p. 34
II.3 Le tritium	p. 41
II.4 Le carbone 14	p. 54
II.5 Les césiums 134 et 137	p. 61
II.6 Le strontium 90	p. 74
II.7 L'iode 131	p. 80
II.8 Les autres produits de fission et d'activation	p. 87
II.9 Les uraniums 234, 235 et 238	p. 96
II.10 Les transuraniens (Am, Pu)	p. 104
III Les constats radiologiques régionaux	p. 112
III.1 Objectif et méthodologie	p. 114
III.2 Le constat « Vallée du Rhône »	p. 116
III.3 Le constat « Sites miniers du bassin versant de la Dordogne »	p. 121
III.4 Le constat radiologique en Nouvelle-Calédonie	p. 124
IV Annexes	p. 126
IV.1 Présentation et exploitation des résultats	p. 128
IV.2 Glossaire	p. 130
IV.3 Sources d'information	p. 135
IV.4 Comité éditorial	p. 136

Depuis dix ans maintenant, la publication de ce rapport constitue un rendez-vous régulier qui clôt une période de plusieurs mois de surveillance radiologique de l'environnement français. Dans le cadre des politiques publiques de sûreté nucléaire et de radioprotection, l'IRSN est en effet en charge de cette surveillance nationale participant ainsi à garantir au mieux la protection des populations.

Pour répondre à cette mission, qui a plusieurs objectifs (contrôle des installations, surveillance de l'état radiologique du territoire, alerte en cas d'élévation anormale de radioactivité), l'IRSN a déployé une stratégie issue d'une réflexion approfondie sur l'adéquation des moyens aux objectifs fixés, tout en tenant compte d'éléments de contexte qui ont fortement évolué ces dernières années :

- la diminution des niveaux de radioactivité artificielle en France conduit de plus en plus fréquemment à des concentrations inférieures aux limites de détection des équipements de mesure couramment utilisés ;
- les évolutions technologiques en matière de détection et le vieillissement des réseaux, mis en place pour la plupart à la fin des années 1980, incitent à les moderniser ;
- les autorités, mais également les acteurs de la société (associations, élus, commissions locales d'information...), ont des demandes nouvelles qui doivent être intégrées aux missions de l'IRSN ;
- les états frontaliers mènent également des réflexions sur l'état de leurs réseaux et les évolutions doivent prendre en compte la continuité en zone frontalière ;
- la nécessité de mieux intégrer les dispositifs de surveillance dans les besoins d'expertise en situations accidentelles et post accidentelles s'est accentuée avec le retour d'expérience, mené en France, à la suite de l'évènement de Fukushima.

Cette stratégie est élaborée dans un environnement de plus en plus contraint ; il convient d'optimiser les moyens afin de répondre toujours mieux aux attentes de la société tout en veillant à la préservation sur le long terme des actions engagées.

C'est donc en intégrant ces différents éléments de contexte que l'IRSN a développé une stratégie de surveillance renouvée, basée sur des technologies et des équipements nouveaux. Ces équipements s'intègrent dans des dispositifs de natures diverses :

- des balises de mesure automatique qui, en temps réel, peuvent déclencher une alerte en cas d'élévation inhabituelle de la radioactivité dans l'air ou dans les fleuves ;
- la collecte régulière d'échantillons sur plusieurs centaines de stations du territoire, puis leur mesure afin de quantifier les niveaux d'activité dans une vingtaine de matrices différentes (sédiments, herbes, mousses, mollusques...);
- un prélèvement continu d'échantillons d'eau et d'aérosols en des points stratégiques du territoire puis une mesure en différé dans les laboratoires accrédités de l'Institut.

Dans la continuité de l'édition précédente, qui avait pris en compte les résultats de la surveillance renforcée mise en place consécutivement à l'accident de Fukushima, ce rapport présente les données acquises entre juillet 2011 et décembre 2012 dans le cadre du suivi par l'IRSN des niveaux de radioactivité sur le territoire national. Les résultats acquis en Polynésie française font l'objet d'un rapport spécifique, consultable sur le site Internet de l'IRSN : irsn.fr (rubrique Rapports d'expertise/Surveillance de l'environnement).

Cette année, à nouveau, nous avons voulu que ce document constitue une référence dans le domaine de la surveillance de la radioactivité de l'environnement en proposant une version simplifiée présentant les résultats selon un découpage par radionucléides : les principaux radionucléides d'origine artificielle provenant

soit des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, soit des rejets réglementés des installations nucléaires et de ceux liés aux activités de médecine nucléaire ; et certains radionucléides naturels également produits et rejetés par les activités anthropiques sont analysés dans les différents compartiments de l'environnement (compartiments atmosphérique, aquatique continental, marin et terrestre). Ce découpage permet de mettre en lumière le devenir spécifique des principaux radionucléides présents dans l'environnement.

Compte tenu du grand nombre de données acquises tout au long de ces dix-huit mois, accessibles intégralement sur le site Internet de l'IRSN, seule une partie des résultats est présentée sous forme de graphiques ou de tableaux synthétiques (moyenne sur l'année) et commentés spécifiquement. Pour retrouver tous les résultats ou accéder à ceux qui ne sont pas repris dans ce bilan, je vous invite à vous reporter au portail environnement Internet de l'IRSN (<http://environnement.irsn.fr>), ou encore au portail du Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM) (<http://www.mesure-radioactivite.fr>) dont l'IRSN assure la gestion et qui publie l'ensemble des résultats de mesures réalisés par les acteurs du nucléaire français.

Du point de vue qualitatif, les niveaux de radioactivité mesurés par le dispositif de surveillance de l'IRSN en 2011 et 2012 restent faibles et dans la gamme habituellement observée ces dernières années.

D'une manière générale, un marquage de l'environnement par des radionucléides artificiels est mis en évidence hors des zones d'influence, en raison de l'apport des retombées passées (essais atmosphériques d'armes nucléaires entre 1945 et 1980, accident de Tchernobyl en 1986...) qui affectent l'ensemble du territoire ou en raison d'activités industrielles anciennes insuffisamment maîtrisées (sites pollués). Ce marquage est plus particulièrement observable dans les sols et dans les milieux aquatiques continentaux et marins (sédiments, mollusques et crustacés).

Le tritium et le carbone 14 sont les deux radioéléments (naturels mais également produits par les activités humaines) les plus largement mesurés dans l'ensemble des compartiments (atmosphérique ou aquatiques continental et marin) ; tous deux étant à la fois des radionucléides naturels et également présents dans les effluents liquides et gazeux des installations nucléaires. Ainsi, un net marquage par du tritium est observé dans l'environnement proche des installations nucléaires de Marcoule, Valduc ou encore La Hague, et dans une moindre mesure des centrales nucléaires de production d'électricité d'EDF. De même, du carbone 14 est présent en quantité significativement plus élevée en aval qu'en amont des installations nucléaires situées sur les grands fleuves.

L'édition 2012 de ce bilan s'accompagne d'évolutions qui sont le reflet des inflexions opérées depuis 2008 par l'IRSN dans le cadre de sa mission de surveillance radiologique du territoire : réalisation de constats radiologiques territoriaux en complément de la surveillance dite de routine. Ainsi, un chapitre est entièrement dédié aux constats radiologiques en cours ou finalisés. La méthodologie mise en œuvre pour réaliser les constats est détaillée et les principaux résultats obtenus pour quelques constats sont présentés.

Je vous souhaite une agréable lecture du bilan 2012, en espérant qu'il réponde à vos attentes.



Jacques Repussard
Directeur Général





© Olivier Seignette / Mikael Lafontan / IRSN

I

LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

- I.1 La radioactivité naturelle et artificielle en France
- I.2 Pourquoi surveiller la radioactivité dans l'environnement ?
- I.3 Comment surveille-t-on la radioactivité dans l'environnement ?
- I.4 Comment mesure-t-on la radioactivité ?

La radioactivité est un phénomène physique naturel qui existe dans l'Univers depuis son origine. Elle est donc présente partout sur Terre, au sein même de la matière, minérale et organique, et de tous les êtres vivants. La radioactivité actuelle de l'environnement résulte de radionucléides naturels, mais également de radionucléides artificiels introduits par l'homme depuis le début du XX^e siècle. Il est nécessaire de surveiller et d'étudier le devenir de ces substances radioactives dans l'environnement afin de connaître leur impact éventuel sur le milieu naturel et l'homme. La surveillance radiologique s'effectue sur l'ensemble des compartiments environnementaux (air, eau, sol, faune, flore) ainsi que sur la chaîne alimentaire.

1 LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE ET ARTIFICIELLE EN FRANCE

La radioactivité naturelle

La radioactivité fait partie de l'Univers. L'atmosphère et la croûte terrestre contiennent des éléments radioactifs. Dès la formation de la Terre, il y a environ cinq milliards d'années, la matière était constituée d'éléments radioactifs et d'éléments stables. Depuis, la radioactivité n'a cessé de décroître puisque de nombreux atomes radioactifs se sont transformés, pour l'essentiel, en éléments stables.

Les sources de radioactivité naturelle

• **Les rayons cosmiques** ont deux composantes. La première est due aux ions très énergétiques, en provenance des galaxies. L'autre composante vient du soleil : le « vent solaire » est surtout constitué de protons. Le champ magnétique terrestre forme la magnétosphère qui, avec l'atmosphère, crée un écran protecteur de sorte que seulement 0,05 % du rayonnement cosmique arrive au niveau de la mer.

À l'inverse, l'importance du rayonnement cosmique augmente avec l'altitude (figure 1.1).

• **La radioactivité du sol** (ou rayonnement tellurique) est émise par de nombreux éléments radioactifs présents dans l'écorce terrestre, comme l'uranium et le thorium. Elle varie selon la nature du sol ; elle est ainsi cinq à vingt fois plus élevée dans les massifs granitiques que sur des terrains sédimentaires.

• **La radioactivité des eaux** ne reflète que partiellement la nature géologique des terrains traversés. Tout dépend des caractéristiques chimiques de l'eau et du degré de solubilité des radionucléides. Les eaux minérales sont plus radioactives que les eaux de surface, et certaines eaux souterraines sont riches en gaz radon dissous.

• **La radioactivité de l'air** est essentiellement due au radon 222 sous forme gazeuse, lui-même issu de l'uranium 238. Cette composante (la plus importante de l'exposition naturelle) est très variable. Elle dépend de la richesse du sol en uranium 238, de la porosité du sol, des matériaux de construction et de la ventilation de l'habitat qui peut concentrer par confinement la diffusion du gaz radon. Ce gaz, ainsi que les produits qui en dérivent, se fixe dans les voies respiratoires.

Figure 1.1 - La dose due aux rayonnements cosmiques croît avec l'altitude.

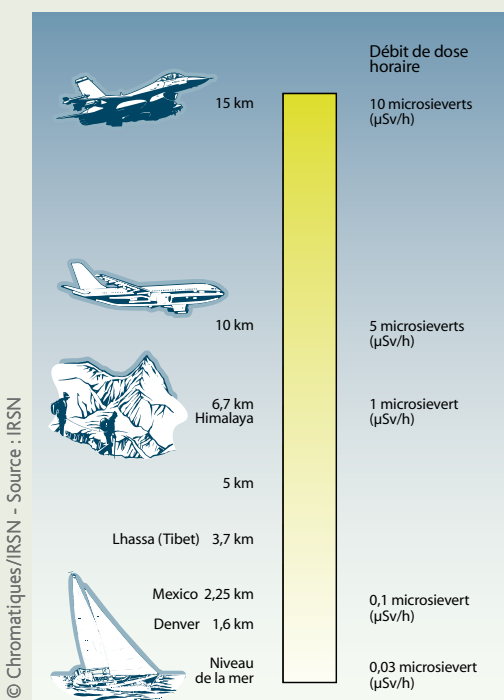
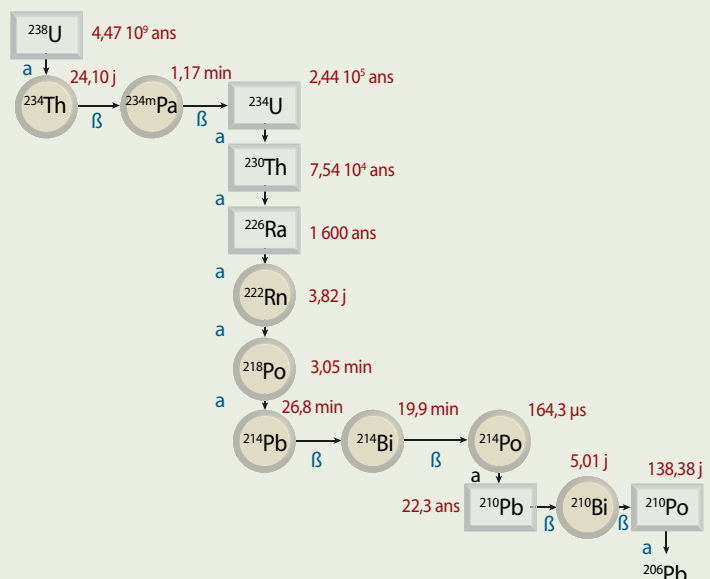


Figure 1.2 - Chaîne de filiation de l'uranium 238.



- **La radioactivité du corps humain**, de l'ordre de 120 Bq/kg (8 400 Bq pour une personne de 70 kg), est due à l'ingestion d'aliments contenant des éléments radioactifs. Après ingestion, ces radionucléides viennent se fixer dans les tissus et les os. Ainsi, l'organisme humain compte en moyenne 4 500 Bq en potassium 40 et 3 700 Bq en carbone 14.

Les radionucléides d'origine naturelle

Parmi les 340 types d'atomes qui existent dans la nature, 70 ont des noyaux instables radioactifs (radionucléides). Il ne reste aujourd'hui qu'une vingtaine de ces radionucléides « primordiaux », ceux de période très courte par rapport à l'âge de la Terre ayant disparu.

Ces radionucléides naturels, qui constituent l'essentiel de la radioactivité de l'environnement, se retrouvent dans l'air, le sol, l'eau et les organismes vivants dont l'homme. Il s'agit soit de radionucléides de période radioactive très longue présents sur Terre depuis sa formation (potassium 40, uranium 238, uranium 235, thorium 232), soit de radionucléides créés en permanence dans la haute atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique, qualifiés de radionucléides cosmogéniques (tritium, carbone 14, krypton 85, béryllium 7 et sodium 22).

Si la plupart de ces radionucléides se désintègrent directement en éléments stables, non radioactifs, trois d'entre eux (^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th) ont plusieurs descendants radioactifs, qui constituent des familles ou chaînes de désintégration comportant chacune entre dix et quinze radionucléides différents (figure 1.2).

Cas particulier du radon

Le radon (Rn) est un gaz radioactif omniprésent à la surface de la Terre. Il possède trois isotopes naturels (^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn) descendants des radioéléments présents dans les sols (^{235}U , ^{232}Th et ^{238}U).

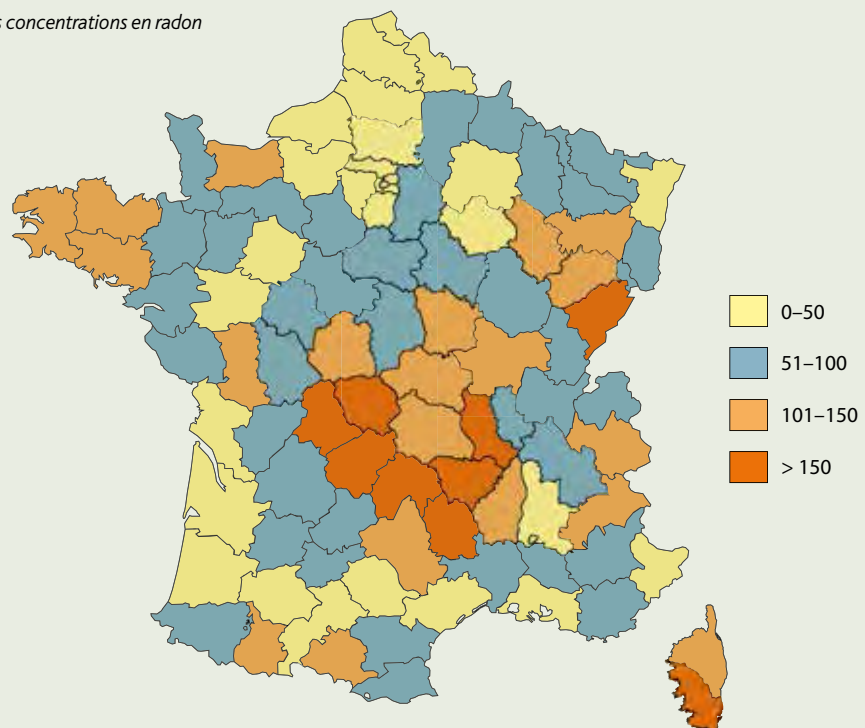
Le radon 222 sous forme gazeuse, descendant du radium (^{226}Ra) qui est lui-même un descendant de l'uranium 238, est l'isotope le plus abondant dans l'atmosphère à cause de sa période radioactive (3,82 jours) suffisamment longue pour lui permettre de migrer dans les sols, depuis la roche qui lui a donné naissance, jusqu'à l'atmosphère. En se désintégrant, le radon émet des particules alpha et engendre des descendants solides eux-mêmes radioactifs (polonium, bismuth, plomb...).

Par différents processus physiques, il migre du sol jusqu'à l'air libre et peut s'accumuler dans l'atmosphère plus confinée des bâtiments (figure 1.3). L'inhalation du radon et de ses descendants constitue, pour la population française, la première cause d'exposition parmi les sources naturelles de rayonnements ionisants. C'est l'augmentation du risque de cancer du poumon qui motive la vigilance à l'égard du radon dans les habitations et les mines souterraines.

La radioactivité naturelle renforcée

Le « bruit de fond » radioactif naturel a toujours existé et, en moyenne, l'exposition totale subie par l'homme a sans doute peu varié au cours des siècles. Toutefois, des changements dans les modes de vie ou l'introduction de nouvelles pratiques ont pu modifier quelque peu cette situation.

■ **Figure 1.3** - Moyenne par département des concentrations en radon dans l'air des habitations (Bq/m³).



Certaines circonstances peuvent conduire à des expositions parfois relativement importantes à la radioactivité naturelle artificiellement augmentée :

1 – Le confinement du radon dans les habitats : l'utilisation de certains matériaux de construction émettant du radon, des constructions mal isolées de sols uranifères, des habitats trop confinés peuvent conduire à des expositions conséquentes.

2 – Les procédés de production de certaines activités industrielles, non liées au cycle électronucléaire, peuvent modifier les équilibres physico-chimiques de la radioactivité naturelle contenue dans les matières utilisées et la concentrer dans les déchets produits. Il s'agit alors de radioactivité naturelle technologiquement renforcée. Elle représente un risque éventuellement accru de dissémination dans l'environnement et donc d'exposition humaine, même après l'arrêt de l'activité industrielle. Cette radioactivité naturelle involontairement renforcée provient des industries extractives de minerais et de ressources géologiques ainsi que des étapes successives de séparation, d'épuration, de transformation, et d'utilisation des sous-produits.

Il s'agit principalement des activités suivantes :

- la combustion de charbon en centrales thermiques ;
- le traitement des minerais d'étain, d'aluminium, de cuivre, de titane, de niobium, de bismuth et de thorium ;
- la production de céramiques réfractaires ;
- la production ou l'utilisation de composés comprenant du thorium ;
- la production de zircon et de baddaleyite ;
- la production d'engrais phosphatés et la fabrication d'acide phosphorique ;
- le traitement du dioxyde de titane ;
- le traitement des terres rares et la production de pigments en contenant ;

- le traitement par filtration d'eau souterraine destinée à la production d'eau de consommation ;
- les établissements thermaux.

3 – L'extraction et le traitement de minerais d'uranium génèrent aussi une radioactivité naturelle renforcée, mais dans ce cas, à la différence des activités industrielles mentionnées précédemment, le minerai est utilisé pour ses propriétés radioactives.

La radioactivité artificielle

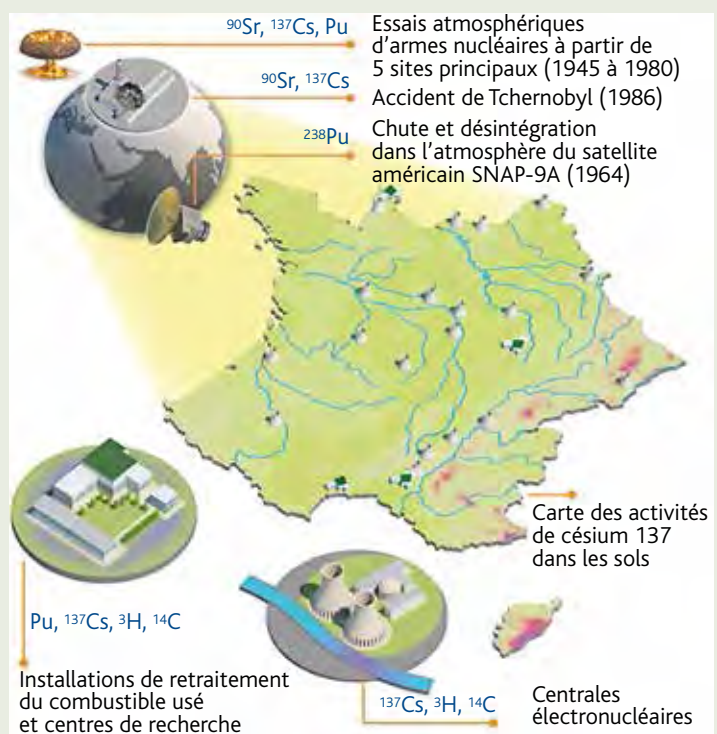
Par opposition aux radionucléides naturels, les radionucléides « artificiels » désignent les éléments radioactifs qui n'existent plus sur la Terre, et qui sont formés artificiellement.

Depuis le début du XX^e siècle, les activités humaines ont entraîné la présence de radioactivité artificielle dans l'environnement. La production de radionucléides artificiels se fait au moyen d'un accélérateur de particules ou d'un réacteur nucléaire.

Certains radionucléides peuvent être utilisés comme source de rayonnements pour des radiographies ou comme source d'irradiation pour des applications industrielles ou médicales (radiothérapie). D'autres sont produits dans les réacteurs nucléaires. Certains de ces radionucléides, fortement radioactifs et actuellement inutilisés par l'homme, constituent des déchets devant être stockés sous haute surveillance.

Actuellement, une dizaine de radionucléides artificiels sont régulièrement mesurés dans l'environnement français dont le strontium 90, le césium 137, l'iode 131, les isotopes du plutonium (²³⁸Pu, ²³⁹Pu, et ²⁴⁰Pu) ainsi que l'américium 241. Du tritium et du carbone 14, tous deux d'origine naturelle et artificielle, sont également mesurés dans l'environnement.

Figure 1.4 - Les principales sources de radioactivité artificielle dans l'environnement français.



Ces radionucléides ont pour origines principales (figure 1.4) :

- les rejets réglementés et autorisés des installations nucléaires et ceux liés aux activités de médecine nucléaire ;
- les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires (de 1945 à 1980) et de l'accident de Tchernobyl en 1986.

La rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl et des tirs atmosphériques constitue aujourd'hui le bruit de fond de la radioactivité artificielle de l'environnement français.

Les rejets des installations industrielles et de recherche sur l'énergie nucléaire, dont les centrales nucléaires de production d'électricité, sont réglementés. Pour fonctionner, la plupart des installations du cycle utilisent de l'eau prélevée soit dans les cours d'eau, soit dans la mer (figure 1.5). L'utilisation de cette eau conduit en partie à la production d'effluents qui sont traités en vue de retenir la plus grande partie de l'activité sous forme solide (déchets). Les effluents résiduels sont ensuite rejetés par voies liquide et atmosphérique après des contrôles permettant de garantir le respect des prescriptions réglementaires établies par les autorités (débit, activités rejetées, radionucléides présents...).

Les radionucléides rejetés par les installations nucléaires sont multiples et diffèrent en fonction du type d'installation et de sa phase de fonctionnement (production, arrêt pour maintenance, démantèlement...). Les activités rejetées par ces installations, en fonctionnement normal, ont évolué également dans le temps en fonction des renouvellements des autorisations de rejets toujours plus contraignantes délivrées par les autorités et au gré de la mise en œuvre de nouveaux procédés de traitement des effluents.

Aujourd'hui, les rejets des installations nucléaires françaises du cycle du combustible sont dominés en quantité par trois radionucléides :

- le krypton 85, gaz rare, donc inerte chimiquement, de

10,7 ans de période, rejeté sous forme gazeuse lors du traitement du combustible usé (usine Areva NC de La Hague) ;

- le tritium ;
- le carbone 14.

Les rejets provenant des activités de médecine nucléaire (examens radiologiques et traitements médicaux) sont caractérisés par des radionucléides de période radioactive très courte (huit jours pour l'iode 131 et six heures pour le technétium 99 métastable).

I.2 POURQUOI SURVEILLER LA RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT ?

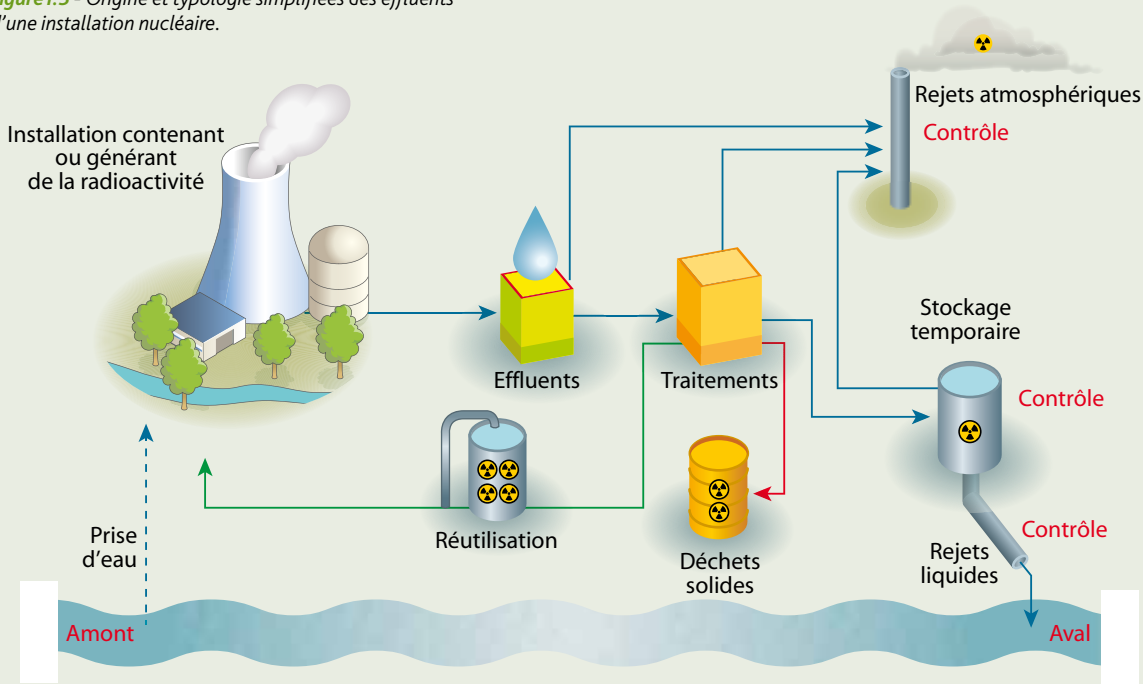
La dispersion des radionucléides dans la biosphère

Les activités industrielles et humaines mettant en œuvre des substances radioactives (*chapitre 1.1*) sont susceptibles d'entraîner le rejet de radionucléides dans l'environnement, soit dans le cadre de leur fonctionnement normal, soit lors d'incidents ou d'accidents d'exploitation.

Il s'agit en particulier :

- de l'émission de substances radioactives dans l'air ou dans les milieux aquatiques et marins liées aux activités nucléaires (figure 1.5). Elle se fait dans des conditions contrôlées, définies par des autorisations de rejet délivrées par les autorités. La réglementation applicable aux rejets a évolué au fil des années, notamment pour ce qui concerne les limites de rejets qui sont régulièrement revues à la baisse ;

■ **Figure 1.5** - Origine et typologie simplifiées des effluents d'une installation nucléaire.



- **de la diffusion**, notamment par les eaux d'infiltration, de radionucléides contenus dans des résidus déposés en surface ou enfouis dans le sol, dans des conditions qui ne permettent pas d'assurer un confinement total des radionucléides. En l'occurrence, ceci concerne par exemple les anciens sites ayant mis en œuvre des radionucléides naturels au cours de la première moitié du XX^e siècle ;

- **du rejet accidentel de substances radioactives dans l'air**, dans l'eau ou sur le sol, directement ou du fait des retombées atmosphériques de poussières (exemple : l'accident de Tchernobyl en avril 1986) ;

- **de la persistance dans l'environnement de radionucléides à vie longue** (période radioactive dépassant plusieurs années) provenant de rejets anciens dans l'air ou dans l'eau, tendant à se fixer dans les sols, les sédiments ou certains organismes vivants. En France, comme dans le reste de l'Europe, il existe une rémanence de radionucléides due aux retombées atmosphériques des tirs nucléaires et de l'accident de Tchernobyl.

En outre, des sources naturelles apportent régulièrement des radionucléides dans l'environnement ; il s'agit par exemple du carbone 14 (¹⁴C), du tritium (³H), du potassium 40 (⁴⁰K), de l'uranium et du thorium et de leurs descendants radioactifs.

Il est nécessaire de surveiller et d'étudier le devenir de ces substances radioactives dans l'environnement, afin de connaître leur impact éventuel sur la santé de l'homme, l'environnement et sur les ressources d'intérêt économique (notamment l'eau et l'agriculture). La surveillance radiologique s'effectue donc sur l'ensemble des compartiments de l'environnement : l'air, les eaux, les sols, les compartiments biologiques (faune, flore) et la chaîne alimentaire.

Les objectifs de la surveillance radiologique effectuée par l'IRSN

La surveillance radiologique du territoire français est une des missions fondamentales de l'IRSN¹. Elle est indissociable des missions d'information du public et d'appui technique aux pouvoirs publics, notamment à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). **La surveillance radiologique de l'environnement menée par l'IRSN répond aux objectifs principaux et complémentaires suivants :**

- **La protection sanitaire des populations et de l'environnement au regard des expositions radiologiques.**

La surveillance de l'environnement va permettre de contribuer à l'estimation de l'impact des rayonnements ionisants sur l'homme et sur l'environnement, que leur origine soit naturelle ou anthropique (rejets des installations nucléaires...).

- **La connaissance de l'état radiologique de l'environnement.**

Cet objectif passe par le suivi de l'évolution spatiale et temporelle des niveaux de radioactivité présents dans les différents compartiments de l'environnement sur l'ensemble du territoire, même s'il se focalise plus particulièrement sur l'environnement des principales installations susceptibles de rejeter des radionucléides.

- **La détection précoce de toute élévation anormale de radioactivité pouvant résulter d'un incident ou d'un accident survenant dans une installation nucléaire.**

La surveillance de la radioactivité de l'environnement doit

1 - Décret de création de l'IRSN n° 2002-254 du 22 février 2002. L'article 1-II précise que l'Institut « participe à la veille permanente en matière de radioprotection, notamment en concourant à la surveillance radiologique de l'environnement... ».

Focus

Le réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM)

Outre l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, la surveillance radiologique de l'environnement en France implique des acteurs multiples, principalement les exploitants d'activités nucléaires et les autorités qui en assurent le contrôle. D'autres acteurs de la société, notamment associatifs (commissions locales d'information, associations de surveillance de la qualité de l'air, associations de défense de l'environnement), participent également à des activités d'étude ou de surveillance de la radioactivité de l'environnement.

Créé en 2003, le RNM s'inscrit dans une démarche de progrès visant, d'une part, à s'assurer de la qualité des mesures de radioactivité fournies par des laboratoires de mesure de la radioactivité de l'environnement, et d'autre part à mieux informer les citoyens sur l'état radiologique de l'environnement.



La mise en place de ce réseau répond donc à deux objectifs majeurs :

- *assurer la transparence des informations sur la radioactivité dans l'environnement en mettant à disposition du public les résultats de cette surveillance dans l'environnement et des informations sur l'impact radiologique des activités nucléaires en France ;*
- *poursuivre une politique d'assurance de la qualité pour les mesures de radioactivité dans l'environnement par l'instauration d'un agrément des laboratoires, délivré par décision de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en application de l'article L. 592-21 du code de l'environnement.*

Le RNM a notamment pour mission de contribuer à l'estimation des doses dues aux rayonnements ionisants auxquels la

permettre de détecter et de suivre aussi rapidement que possible toute élévation anormale de la radioactivité, que son origine soit consécutive à une situation accidentelle ou incidente, ou qu'il s'agisse de phénomènes naturels ponctuels (météorologiques notamment). Pour cela, l'Institut utilise des moyens permettant de détecter et de suivre aussi rapidement que possible une évolution anormale de la radioactivité dans l'environnement. L'IRSN est ainsi en mesure d'alerter précocement et de conseiller les autorités pour la gestion de crise qui en découle.

• **Le respect de la réglementation par les exploitants exerçant une activité nucléaire.**

L'impact des installations nucléaires est estimé en premier lieu à partir de leurs rejets et non à partir des mesures directes effectuées dans l'environnement. Néanmoins, quel que soit le statut juridique de l'installation (installations nucléaires de base, installations classées pour la protection de l'environnement, activités soumises au code de la santé publique), une surveillance particulière doit être mise en place pour vérifier que les doses engendrées par ces installations restent très inférieures aux valeurs limites fixées par la réglementation (1 mSv/an pour le public) et que l'exploitant respecte les valeurs limites de rejets qui lui sont fixées par les autorités. Afin de déceler d'éventuels « marquages discrets » provenant des rejets autorisés des installations et en complément de la surveillance réglementaire assurée par les exploitants, l'Institut exploite des dispositifs de prélèvements dans les différents compartiments de l'environnement, localisés à proximité des installations nucléaires. Par son expérience acquise et ses moyens opérationnels d'expertise qu'il déploie dans ce cadre, l'Institut contribue ainsi à l'évolution de la réglementation dans ce domaine.

• **Informers le public et les autorités.**

L'ensemble de la surveillance doit permettre d'informer le public et les autorités sur les niveaux de radioactivité rencontrés dans

l'environnement. Les résultats de la surveillance réalisée par l'IRSN sont restitués sur son site Internet (www.irsn.fr) via un portail environnement dédié (<http://environnement.irsn.fr>). Ils font, par ailleurs, l'objet de publications périodiques (bilans radiologiques, constats régionaux...) mis en ligne et téléchargeables sur ce même portail.

Les principales installations nucléaires en France

La France abrite de nombreuses installations nucléaires ayant des activités variées. Parmi les installations nucléaires, on distinguera notamment les installations du cycle du combustible destinées à la production puis au retraitement du combustible nucléaire, les centrales nucléaires, les centres de recherche et les centres de stockage de déchets radioactifs. Certaines installations nucléaires ont des activités intéressant la Défense nationale (Installations nucléaires de base secrètes entre autres) : elles sont alors régies par le code de la Défense, et l'autorité compétente en matière de sûreté est le Délégué à la sûreté nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la Défense (DSND) mais elles sont également soumises à des règles de rejet et de contrôle de leur environnement.

L'industrie a également recours à des installations nucléaires non directement liées à l'industrie électronucléaire, destinées par exemple à la production de radio-pharmaceutiques, au traitement et au conditionnement de déchets de faible activité ou encore à assurer des activités de maintenance nucléaire.

Enfin, un certain nombre d'installations sont en cours de démantèlement ; ces opérations de démantèlement peuvent aussi être à l'origine de rejets de matières radioactives et, à ce titre, ces installations doivent également faire l'objet de contrôle et de surveillance de leur environnement.

population est exposée et à l'information du public. Pour atteindre cet objectif, le RNM rassemble et met à la disposition du public des résultats de mesures de la radioactivité de l'environnement effectuées par les laboratoires agréés ainsi que des documents de synthèse sur la situation radiologique du territoire et sur l'évaluation des doses dues aux rayonnements ionisants auxquels la population est exposée.

Les mesures doivent obligatoirement être effectuées par des laboratoires agréés. Au total, une cinquantaine de types de mesures sont couvertes par un agrément. Il leur correspond autant d'essais de comparaison interlaboratoires organisés par l'IRSN sur un cycle de cinq ans, durée maximale de validité des agréments. Les laboratoires sont agréés par décision de l'ASN publiée dans son Bulletin officiel.

Le RNM est développé sous l'égide de l'ASN en coordination avec l'IRSN et les acteurs du réseau qui comprennent des représentants des différents ministères concernés (Défense, Environnement, Santé, Agriculture, Consommation), des agences de sécurité sanitaire, des industriels du nucléaire, des services de

l'État et des associations de protection de l'environnement et des consommateurs.

Au 31 décembre 2013, plus d'un million de mesures ont été transmises au système d'information du RNM par les différents producteurs. En moyenne, depuis février 2009, 18 000 nouvelles mesures sont transmises par mois.

L'IRSN est le principal producteur de mesures avec 44 % des mesures de la base. Les autres principaux producteurs sont, par ordre décroissant de mesures transmises, EDF (21 %), le CEA (14,5 %), Areva (12,7 %), l'Andra (3 %), la Marine nationale (3 %) et l'ILL (1,3 %). Cette répartition reflète le nombre de sites nucléaires exploités par les différents producteurs.

La mise à disposition des données collectées vers le public est effectuée via le site Internet du RNM (www.mesure-radioactive.fr). Le premier bilan de l'état radiologique de l'environnement réalisé à partir de l'ensemble des données du RNM, a été publié par l'IRSN en 2012 (rapport disponible sur les sites Internet du RNM et de l'IRSN).

La surveillance de l'environnement par les exploitants d'installations nucléaires

Les exploitants d'installations nucléaires ont la responsabilité d'assurer le contrôle des effluents rejetés par leurs installations ainsi que l'environnement à la périphérie des sites nucléaires et à l'intérieur des sites. D'une manière générale, cette surveillance est encadrée par des prescriptions réglementaires fixées dans les autorisations de rejets, qui imposent la réalisation, par les exploitants, d'un programme de surveillance régulière de l'environnement de leurs sites (surveillance dite « réglementaire »). L'ensemble de ce dispositif de surveillance placé sous la responsabilité de l'exploitant nucléaire constitue la source principale de production de résultats de mesures permettant de connaître régulièrement l'état radiologique à l'intérieur des sites nucléaires et dans les quelques kilomètres autour de ces sites.

Les installations du cycle du combustible

Jusqu'en 2001, date de fermeture de la dernière mine d'uranium en exploitation, la France était le seul pays à être doté sur son territoire de l'ensemble des industries du cycle regroupant les étapes suivantes (figure 1.6) :

- **extraction de l'uranium des mines** (anciens sites miniers dont la gestion est actuellement confiée à Areva) ;
- **concentration et conversion des composés de l'uranium** (Comurhex Malvézi et Pierrelatte) ;
- **enrichissement isotopique en uranium 235**, processus par lequel est accrue la teneur d'un élément chimique en un de ses isotopes (Eurodif et SET sur le site du Tricastin) ;
- **fabrication du combustible MOX** (Melox, Marcoule) ;
- **fabrication et assemblage du combustible** (FBFC Romans-sur-Isère) ;
- **traitement du combustible usé déchargé des réacteurs et recyclage** (Areva La Hague) et R&D dans ces domaines (CEA Marcoule) ;

- **traitement et stockage des déchets** (Andra, centres de la Manche, de Soulaines et de Morvilliers).

Le cycle du combustible nucléaire français est dit « fermé » ou « semi-ouvert » du fait des étapes de traitement et de réutilisation d'une partie du combustible usé. Tous les sites du cycle du combustible (figure 1.6) donnent lieu à une surveillance systématique de leur environnement par les exploitants des installations, dès leur mise en service et pendant toute leur durée de vie, selon un programme contrôlé par l'Autorité de sûreté nucléaire.

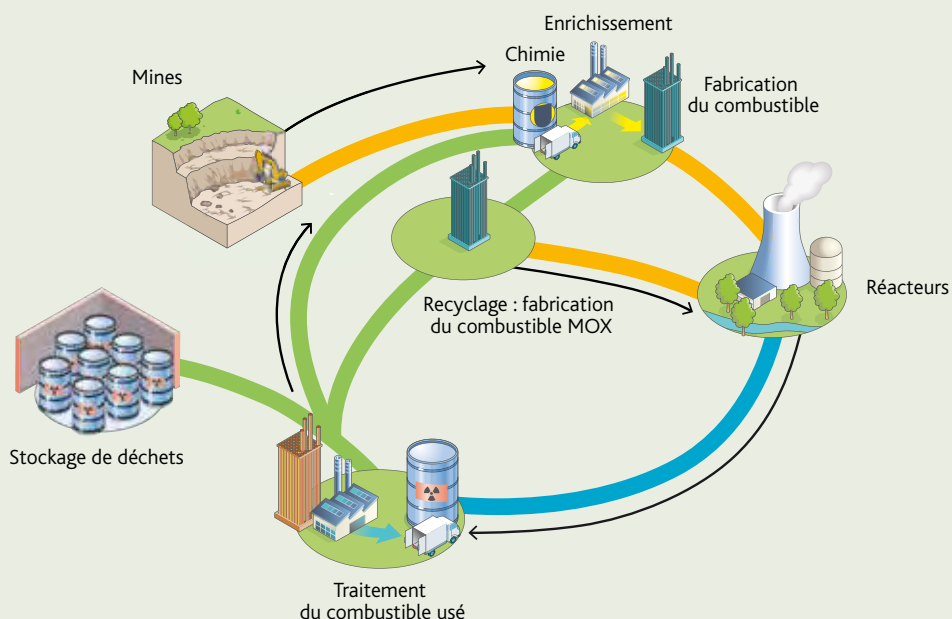
Les plans de surveillance mis en œuvre autour des installations du cycle du combustible tiennent compte du type d'installation surveillée et donc de ses rejets. Ces plans varient également en fonction de l'environnement géographique de l'installation surveillée et répondent aux objectifs spécifiés dans ce chapitre.

Les centrales nucléaires

Les 19 centrales nucléaires actuellement en fonctionnement en France ont été globalement construites sur le même mode. Tous leurs réacteurs utilisent la même technologie, dans laquelle de l'eau sous pression sert à transporter la chaleur produite par les réactions nucléaires. Lors de son fonctionnement, une centrale produit des effluents radioactifs gazeux contrôlés avant leur rejet par les cheminées, et des rejets liquides radioactifs ou non qui sont également contrôlés avant leur rejet dans les canalisations. Ces rejets sont soumis à une réglementation et des contrôles internes et externes stricts avec des limites fixées dans le cadre d'arrêtés de rejets pris par les pouvoirs publics.

Les moyens de traitement des effluents liquides utilisés par les exploitants EDF permettent des rejets à des niveaux d'activité

■ Figure 1.6 - Schéma simplifié du cycle du combustible.



volumique très faibles. Lors d'aléas d'exploitation ou d'opérations particulières, des rejets plus importants peuvent être observés. Globalement, les principaux radionucléides émetteurs gamma émis par les réacteurs à eau pressurisée en fonctionnement normal sont le cobalt 58, le cobalt 60, l'argent 110m et, dans une moindre mesure, le tellure 123m, l'antimoine 124, l'antimoine 125, l'iode 131, le manganèse 54 ainsi que le césium 134 et le césium 137.

Les centres de recherche

La surveillance mise en place autour des centres de recherche est adaptée aux différentes sources d'exposition radiologique potentielles présentes sur ces sites (un centre pouvant regrouper plusieurs types d'installations nucléaires) et aux spécificités environnementales de chacun des sites. Pour cette raison, les programmes de surveillance (fréquence, matrices prélevées, radionucléides) et les résultats associés sont distincts d'un site à l'autre.

Les installations du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) représentent la majorité des centres de recherche concernés par les programmes de surveillance. Cinq centres d'études civils (Saclay, Fontenay-aux-Roses, Cadarache, Marcoule, Grenoble) et deux centres d'études pour les applications militaires (DAM Île-de-France – Bruyères-le-Châtel – et Valduc) du CEA font l'objet d'une surveillance radiologique (figure I.7).

L'Institut Laue-Langevin (ILL) est un organisme de recherche international doté de la source de neutrons la plus intense du monde au service des chercheurs. Il comprend 40 spectromètres de haute technologie donnant des informations sur la structure et la dynamique de la matière. La surveillance de l'environnement du CEA de Grenoble et de l'Institut Laue-Langevin, commune à ces deux sites, est depuis 2010 sous la responsabilité de l'ILL.

Les bases navales nucléaires

Quatre ports militaires de métropole abritent des bases navales nucléaires (Cherbourg, Toulon, Brest et Île-Longue). Ces installations nucléaires présentent la spécificité d'être intégrées au sein ou à proximité d'agglomérations importantes. De plus, ces ports s'ouvrent sur des rades qui constituent des écosystèmes sensibles. Comme tout exploitant, la Marine nationale possède des laboratoires spécialisés dans la surveillance radiologique, qui prélèvent et analysent des échantillons d'origines terrestre, atmosphérique et marine collectés dans l'environnement des ports.

I.3 COMMENT SURVEILLE-T-ON LA RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT ?

La mission de surveillance radiologique de l'environnement est une mission permanente de l'IRSN, inscrite dans son décret de création n° 2002-254 du 22 février 2002, modifié le 7 avril 2007. Dans ce cadre, l'IRSN réalise une surveillance régulière autour des sites nucléaires, complémentaire de celle mise en place par les exploitants nucléaires, mais aussi une surveillance plus générale du territoire. En complément de cette mission fondamentale, l'IRSN contribue à l'évaluation de l'état radiologique de l'environnement :

- en réalisant des expertises au titre de l'appui technique fourni aux autorités compétentes : l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) ou le Délégué à la sûreté nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la défense (DSND), les préfets et les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal). Ces expertises concernent notamment l'analyse des demandes d'autorisation de rejets d'effluents et

Figure I.7 - Localisation géographique des principales installations du cycle du combustible (hors anciennes exploitations minières), des centres nucléaires de production d'électricité, des centres de recherche et des bases navales nucléaires.



de prélèvements d'eau des installations nucléaires (Darpe); l'analyse des rapports de sûreté des installations nucléaires, notamment pour ce qui concerne la connaissance des nappes phréatiques et de leur vulnérabilité, ainsi que des dispositions prévues par l'exploitant pour leur surveillance; et l'évaluation de documents techniques (ex : impact environnemental des anciens sites miniers d'uranium). Ces expertises permettent à l'autorité compétente de fixer les prescriptions des autorisations de rejet ou des autorisations nécessaires au fonctionnement des installations, ou celles relatives à la maîtrise des impacts des anciens sites miniers d'extraction d'uranium. En complément, des experts de l'IRSN peuvent être sollicités pour accompagner des inspections initiées par l'ASN, le DSND ou les Dreal;

- **en effectuant des études et des recherches sur la radioactivité de l'environnement.** L'IRSN acquiert régulièrement des données sur la radioactivité de l'environnement grâce aux études radioécologiques qu'il réalise soit à la demande d'exploitants nucléaires, des pouvoirs publics ou de représentants de la société civile (Commissions locales d'information — Cli, collectivités, associations...), soit dans le cadre de ses propres programmes de recherche. Ces données permettent à l'IRSN de consolider sa connaissance de l'état radiologique de l'environnement.

La stratégie de déploiement des moyens de surveillance par l'IRSN

Le déploiement géographique de la surveillance radiologique par l'IRSN est réalisé selon une stratégie à trois échelles :



- ① **À l'échelle locale,** l'IRSN déploie des moyens de surveillance à proximité immédiate de chaque installation nucléaire. Ces réseaux permanents de stations de prélèvements et de mesures ont un rôle de sentinelle.

Le déploiement géographique des équipements de l'IRSN et les mesures effectuées ont pour objectif d'acquérir rapidement un nombre suffisant de données exploitables en expertise de crise tout en assurant une complémentarité avec les dispositifs de surveillance des exploitants nucléaires.



- ② **À l'échelle régionale,** l'Institut mène des études depuis 2009 qui ont pour objectif d'établir, sur un territoire étendu, un référentiel actualisé des niveaux de radioactivité dans certains compartiments de l'environnement, en particulier dans les productions agricoles et d'élevages caractéristiques du territoire concerné. Ces constats radiologiques prennent en compte la localisation des installations nucléaires, en distinguant les zones potentiellement influencées des zones éloignées pouvant être considérées comme non influencées par les installations en fonctionnement normal.



- ③ **À l'échelle nationale,** le dispositif de surveillance est complété afin d'assurer une couverture homogène du territoire. C'est notamment le cas avec les sondes du réseau Téléray implantées *a minima* dans chaque département. La surveillance par prélèvement effectuée à cette échelle (denrées alimentaires notamment), grâce à la contribution de correspondants locaux, permet d'entretenir en permanence des réseaux de veille mobilisable en cas de crise radiologique.

Les dispositifs mis en œuvre par l'IRSN

La surveillance radiologique de l'environnement repose sur trois types de dispositifs de prélèvements et/ou de mesures :



- **des prélèvements ponctuels d'échantillons environnementaux mesurés *a posteriori* en laboratoire.**

Ces échantillons concernent des matrices variées : les eaux de pluies, les eaux de surface (eaux douces et eaux de mer), les indicateurs biologiques (mousses, algues), les sols et les sédiments, ainsi que les denrées alimentaires (lait et produits laitiers, viande, poisson, mollusques, crustacés, céréales...);



- **des dispositifs de prélèvement en continu avec une mesure différée des échantillons collectés en laboratoire.**

Ces prélèvements concernent essentiellement les mesures effectuées dans le compartiment atmosphérique (aérosols, mesures de radionucléides spécifiques dans l'air comme le tritium et le carbone 14) et dans les eaux de surface (prélèvements par des hydrocollecteurs);



- **des dispositifs de mesure en continu *in situ* associés à un dispositif de retransmission en temps réel.**

Ces dispositifs sont principalement utilisés pour la détection précoce d'événements radiologiques. La télésurveillance en continu concerne principalement l'air (balises de mesures de débit d'équivalent de dose gamma ambiant). L'IRSN dispose également d'un réseau de télésurveillance de l'eau des principaux fleuves le long desquels sont implantées des installations nucléaires.

Face à un contexte nouveau (diminution de l'activité de la plupart des radionucléides artificiels dans l'environnement en relation avec l'évolution des activités nucléaires dont les rejets ont été significativement réduits) et à des évolutions techniques nécessaires (remplacement des équipements anciens moins performants et moins fiables), l'Institut a engagé progressivement depuis 2008 un programme de modernisation et de redéploiement de ses réseaux de surveillance de l'environnement et de ses moyens métrologiques qui se poursuit actuellement.

Éléments méthodologiques pour le choix des stations de surveillance et des matrices environnementales

Les principes généraux d'échantillonnage et de mesure sont similaires à ceux utilisés pour la caractérisation de toute contamination. Ils s'appuient sur les guides et les normes établis notamment dans le cadre du Bureau de normalisation des équipements nucléaires (BNEN de l'Association française de normalisation – Afnor).

Sur un plan méthodologique, l'un des éléments essentiels qui conditionne la représentativité et la validité des mesures est la stratégie d'échantillonnage adoptée.

Dans ce rapport, l'environnement est présenté comme un ensemble de compartiments (terrestre, atmosphérique, aquatique continental et marin), également appelés milieux. Pour chaque compartiment étudié, il convient de définir les critères de choix de l'implantation des stations.

■ **Figure 1.8** - Principes de localisation des stations de prélèvement dans les différents compartiments de l'environnement.

Compartiments terrestre et atmosphérique

Le choix des stations de prélèvement est effectué en tenant compte des conditions de dispersion des rejets atmosphériques de l'installation nucléaire surveillée. Ainsi, autour des installations nucléaires, sur des secteurs sous l'influence des vents dominants, des stations de prélèvement d'aérosols atmosphériques et des collecteurs d'eau de pluie sont systématiquement disposés. Dans la mesure du possible, les prélèvements de lait sont également effectués dans des exploitations agricoles implantées à proximité de l'installation, sous les vents dominants. En complément, certaines agglomérations font également l'objet d'une surveillance radiologique afin d'évaluer l'exposition des populations dans des environnements très urbanisés, qu'ils soient proches ou non de sites nucléaires ou industriels.

Compartiment aquatique continental

Dans ce compartiment, l'implantation des stations de prélèvement tient compte de la présence d'installations nucléaires. Les échantillons d'eau, de flore et parfois de faune sont prélevés à la fois en amont et en aval hydraulique des rejets d'effluents liquides d'un site surveillé pour déterminer, par comparaison des résultats, la contribution effective de cette installation.

Compartiment marin

L'implantation des stations tient compte de la localisation des sources potentielles de rejets et de leurs conditions de dispersion en mer (courantologie, marnage...). Le milieu marin proche des installations nucléaires situées sur le littoral de la Manche et de la mer du Nord subit les marées et un courant de circulation générale qui entraîne un déplacement des masses d'eau de l'ouest vers l'est. La localisation des prélèvements est conditionnée par le fait que l'ouest de la Manche constitue l'amont, et la mer du Nord l'aval des rejets des installations situées sur cette façade maritime. En Méditerranée, c'est le courant Ligure d'est en ouest qui influe de façon prédominante sur le transport et la dispersion des rejets associés, pour l'essentiel, aux eaux du Rhône. Des prélèvements d'eau de mer, de sédiments, de faune et de flore aquatiques sont réalisés à l'est et à l'ouest du delta du Rhône, en tenant compte du courant Ligure.

Critères stratégiques associés aux choix des matrices environnementales

La stratégie d'échantillonnage est fixée en fonction des objectifs visés et en tenant compte des contraintes environnementales telles que les conditions de débit d'un fleuve, les marées, les périodes de végétation et de certains paramètres tels que l'instant où le prélèvement est effectué, ainsi que sa durée et

sa fréquence. Le choix d'un moyen de prélèvement ou de mesure et sa fréquence de mise en œuvre sont adaptés à chaque constituant de l'écosystème ainsi qu'aux radionucléides recherchés.

Les tableaux ci-après détaillent les différents modes de surveillance des compartiments atmosphérique, terrestre, aquatique continental et marin, ainsi que les critères associés à ces choix.

Tableau I.1 - Critères stratégiques associés au choix des matrices prélevées dans les compartiments atmosphérique et terrestre.

Milieu/ produit	Critères stratégiques associés à ce milieu/produit	Moyens de prélèvements et/ou de mesure directe
Air	Milieu récepteur des rejets atmosphériques. Les particules et les gaz radioactifs présents dans l'air délivrent une dose à l'homme par exposition externe et interne (inhalation).	<ul style="list-style-type: none"> • Sondes de mesure en continu du rayonnement gamma ambiant de l'air (réseau Téléray). • Dispositifs de prélèvement en continu d'aérosols atmosphériques (réseau Opera-Air). • Dosimètres environnementaux radio photo luminescents (réseau RPL).
Eaux de pluie	Dépôt humide des aérosols (et donc de la radioactivité) par lessivage de la colonne d'air traversée par les gouttes d'eau.	<ul style="list-style-type: none"> • Collecteurs d'eaux de pluie.
Sols	Accumulation – concentration de la radioactivité par dépôt sec ou humide. Les sols sont également responsables, par voie racinaire, de la contamination des légumes, des fruits ou des graminées.	<ul style="list-style-type: none"> • Prélèvements ponctuels (manuels). • Spectrométrie gamma <i>in situ</i>.
Productions végétales	Contamination par dépôt sur les parties aériennes ou par absorption racinaire. Risque de contamination interne après consommation.	<ul style="list-style-type: none"> • Prélèvements ponctuels (manuels).
Productions animales	La présence de radioactivité dans l'affouragement entraîne son transfert dans les produits d'origine animale dont le lait, vecteur important de radionucléides (césium, strontium, iode...).	<ul style="list-style-type: none"> • Prélèvements ponctuels (manuels).

Tableau I.2 - Critères stratégiques associés au choix des matrices prélevées dans le compartiment aquatique continental.

Milieu/ produit	Critères stratégiques associés à ce milieu/produit	Moyens de prélèvements et/ou de mesure directe
Eaux continentales	Milieu récepteur des rejets liquides des installations et des apports éventuels par les eaux de ruissellement, l'eau est le vecteur direct de la contamination des composants du milieu aquatique.	<ul style="list-style-type: none"> • Dispositifs de prélèvements et de mesure en continu par spectrométrie gamma (réseau Hydrotéléray). • Dispositifs de prélèvement en continu (hydrocollecteurs) pour mesure en laboratoire. • Prélèvements ponctuels.
Matières en suspension dans l'eau (MES)	Les MES sont des supports privilégiés des radionucléides. Leur mobilité contribue à la contamination des berges, des plages ou des terres après des épisodes de crues.	<ul style="list-style-type: none"> • Bacs de décantation associés aux hydrocollecteurs. • Filtration en laboratoire des eaux prélevées.
Sédiments	Les sédiments sont de bons intégrateurs de contamination, et constituent un réservoir de contamination du milieu aquatique par des phénomènes de désorption.	<ul style="list-style-type: none"> • Prélèvements ponctuels (manuels ou mécaniques).
Végétaux aquatiques	Les végétaux aquatiques ont une grande capacité à fixer rapidement certains radionucléides. Leur large répartition géographique permet de comparer les activités massiques en radionucléides en différents lieux.	<ul style="list-style-type: none"> • Prélèvements ponctuels (manuels).
Poissons	Régulièrement consommés par l'homme, les poissons sont de bons intégrateurs des radionucléides. La répartition géographique des espèces prélevées permet également de comparer les activités massiques mesurées sur les différents points de prélèvements du territoire.	<ul style="list-style-type: none"> • Prélèvements ponctuels (pêches).

Plans d'analyse

Dès réception au laboratoire, les prélèvements sont traités et conditionnés en fonction des analyses radiologiques auxquelles ils vont être soumis (*chapitre I.4*). Les analyses réalisées sur chaque échantillon suivent des plans prédéfinis élaborés en fonction de la nature du prélèvement, du compartiment ou de la nature de l'installation ou du site surveillé (taille, nature des rejets) et de son historique événementiel (incidents passés, rejets passés, retombées...).

Pour les installations nucléaires, la nature des prélèvements réalisés et des plans d'analyses est proportionnée aux risques ou inconvénients que peuvent présenter ces installations sur l'environnement. La surveillance de l'environnement des installations nucléaires de base est adaptée à chaque type d'installation (centre nucléaire de production d'électricité, usine, laboratoire).

Le tableau I.4 présente, de façon simplifiée, les plans d'analyses tels qu'ils sont réalisés par l'IRSN dans l'environnement des différents types de site et sur l'ensemble du territoire français.

Tableau I.3 - Critères stratégiques associés au choix des matrices prélevées dans le compartiment aquatique marin.

Milieu/produit	Critères stratégiques associés à ce milieu/produit	Moyens de prélèvements
Eau de mer	Milieu récepteur des rejets liquides et des apports de radionucléides par les eaux de ruissellement, l'eau de mer constitue un vecteur direct de la contamination des composants du milieu marin.	<ul style="list-style-type: none"> Prélèvements ponctuels (manuels). Hydrocollecteurs.
Sédiments	Les sédiments sont de bons intégrateurs de radionucléides et constituent un réservoir de contamination du milieu aquatique par des phénomènes de désorption.	<ul style="list-style-type: none"> Prélèvements ponctuels (manuels).
Algues	Les algues marines réagissent rapidement à des variations de la teneur en radionucléides de l'eau.	<ul style="list-style-type: none"> Prélèvements ponctuels (manuels).
Mollusques	De par leur mode de nutrition, les mollusques marins sont de bons bioindicateurs de surveillance à long terme, qu'ils soient filtreurs ou brouteurs.	<ul style="list-style-type: none"> Prélèvements ponctuels (manuels ou collecte directe chez les producteurs).
Crustacés Poissons	Leur position en fin de chaîne alimentaire en fait de bons intégrateurs des radionucléides. Ils sont, par ailleurs, largement consommés par les populations.	<ul style="list-style-type: none"> Prélèvements ponctuels (pêches ou collecte directe dans les ports).

Tableau I.4 - Plans d'analyses types mis en œuvre par l'IRSN dans le cadre de la surveillance radiologique du territoire français.

Environnement étudié	Radionucléides recherchés							
	U	Am, Pu	³ H	¹⁴ C	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	Iodes	Autres bêta/gamma (*)
Environnement éloigné de site nucléaire								
Ancien site minier								
Site de l'amont du cycle du combustible								
CNPE arrêté	Alpha global							
CNPE en activité								
Site de l'aval du cycle du combustible								
Site de stockage								
Centres de recherches civil ou militaire								
Bases navales								

■ Radionucléide recherché systématiquement

□ Radionucléide recherché ponctuellement en fonction des sites ou lors d'études spécifiques

(*) Autres radionucléides émetteurs bêta/gamma : ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ¹³⁴Cs, ⁴⁰K, ^{99m}Tc...

La surveillance par télémesure

Le réseau Téléray

La surveillance en continu du rayonnement gamma ambiant de l'air est assurée par le réseau Téléray. Ce réseau est constitué de balises, réparties sur l'ensemble du territoire français, effectuant l'enregistrement du débit de dose de manière autonome et en continu. Un serveur centralisé reçoit automatiquement et en temps réel les données et les stocke. Un système de supervision associé à ce serveur peut déclencher une alarme en cas d'élévation du niveau de radioactivité. La consultation et l'exploitation des données ainsi que le pilotage du réseau s'effectuent à partir d'un central de télésurveillance situé sur le site IRSN du Vésinet (figure 1.9).

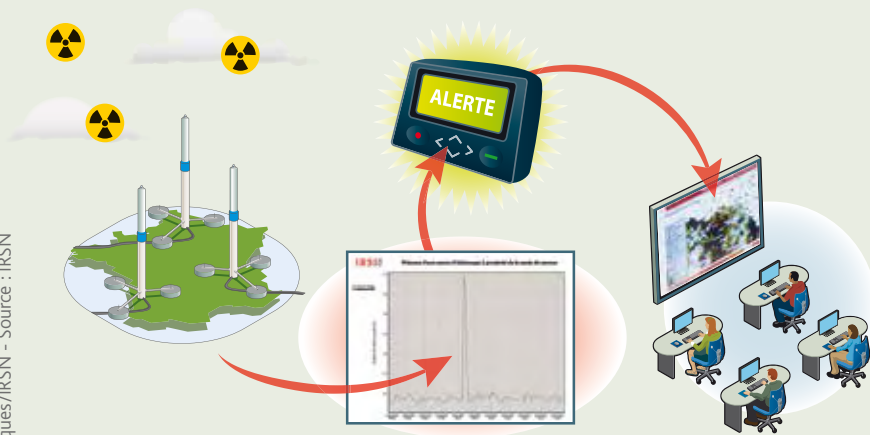
Le projet de modernisation du réseau Téléray, débuté en 2007, s'est poursuivi. Le premier défi de ce projet était technique puisqu'il s'agissait de remplacer l'intégralité des technologies mises en œuvre depuis la création de ce réseau en 1991. Les balises de mesure *in situ* (figure 1.10), le réseau national de transmission et le système de centralisation basé sur le site du Vésinet ont ainsi été entièrement remodelés. Le nouveau système de supervision (Sparte) développé par l'IRSN facilite désormais le traitement et la gestion des données du réseau et a permis d'automatiser leur diffusion, notamment sur le site Internet de l'IRSN (www.irsn.fr).

Le second défi, stratégique, visait d'une part à homogénéiser l'implantation des balises sur l'ensemble des départements français (*a minima* une balise par département) et, d'autre part, à renforcer la surveillance aux abords des installations nucléaires (dans un périmètre de 10 à 30 km) par l'implantation d'une couverture dense de balises de nouvelle génération (figure 1.11). La couverture nationale est désormais orientée sur les préfectures tandis que la stratégie de densification autour des sites nucléaires cible les unités de la gendarmerie nationale, principal partenaire de l'IRSN dans cette phase de redéploiement géographique.

À la suite d'une année pilote fortement impactée par l'accident de Fukushima, le déploiement réalisé en 2012 a permis de consolider les méthodes et de cadencer le rythme de déploiement des nouvelles balises. Conformément au programme prévisionnel et grâce à l'appui technique efficace des unités de la gendarmerie nationale, la couverture dense autour des centrales nucléaires de Chooz, Gravelines, Paluel, Penly, Flamanville et Nogent a été mise en place. L'année 2012 a également marqué la finalisation du déploiement de la couverture nationale réalisé parallèlement dans les préfectures.

À la fin de l'année 2012, le réseau était constitué de 200 balises de nouvelle génération déployées sur l'ensemble du territoire métropolitain et dans les Drom-Com. Les 220 balises restantes seront installées d'ici fin 2015 afin de porter à 420 le nombre total de balises du nouveau réseau Téléray.

Figure 1.9 - Gestion des alertes déclenchées par les balises du réseau Téléray.



© Chromatiques/IRSN - Source : IRSN

Figure 1.10 - Balise Téléray de nouvelle génération installée à l'Aiguille du midi (massif du Mont blanc, 3 842 mètres d'altitude).



© IRSN

Le réseau Hydrotéléray

Le réseau Hydrotéléray, mis en place depuis 1993, permet d'assurer une surveillance radiologique en temps réel de l'eau des sept principaux fleuves français (figure I.19 page 22), en aval de toute installation nucléaire : Ponts-de-Cé (Angers) sur la Loire, Croissy-sur-Seine sur la Seine, Vallabrègues (Arles) sur le Rhône, Vogelgrün sur le Rhin, Rancennes sur la Meuse, Boé (Agen) sur la Garonne et Apach sur la Moselle.

Ce réseau de télémesure a pour objet de garantir en permanence que les niveaux d'activité des cours d'eau qui pourraient résulter d'une situation accidentelle, sont acceptables sur le plan sanitaire avant la sortie du territoire (frontières terrestres et maritimes). À chacune des stations, une mesure par spectrométrie gamma est réalisée durant un temps d'intégration de deux heures pour un débit d'eau de l'ordre de 5 m³/h environ.

Le système se compose d'un détecteur NaI (iodure de sodium) situé dans une cuve en inox blindée de plomb qui permet de diminuer le bruit de fond naturel. Les seuils de décision sont d'environ 0,5 à 1 Bq/L pour le césium 137, l'iode 131 et le cobalt 60. Les données sont automatiquement analysées, stockées et retransmises au centralisateur du site IRSN du Vésinet. Une alarme peut être déclenchée si une activité anormale est détectée.

La surveillance par prélèvement

Pour évaluer les niveaux de radioactivité dans l'environnement, les balises de télémesure ne suffisent pas car, d'une part, elles n'identifient pas tous les radionucléides présents ou rejetés dans les différents compartiments de l'environnement (biologique notamment) et parce que, d'autre part, les activités présentes dans l'environnement se situent parfois à des niveaux bien inférieurs aux niveaux détectables par les meilleures techniques de détection par télémesure disponibles.

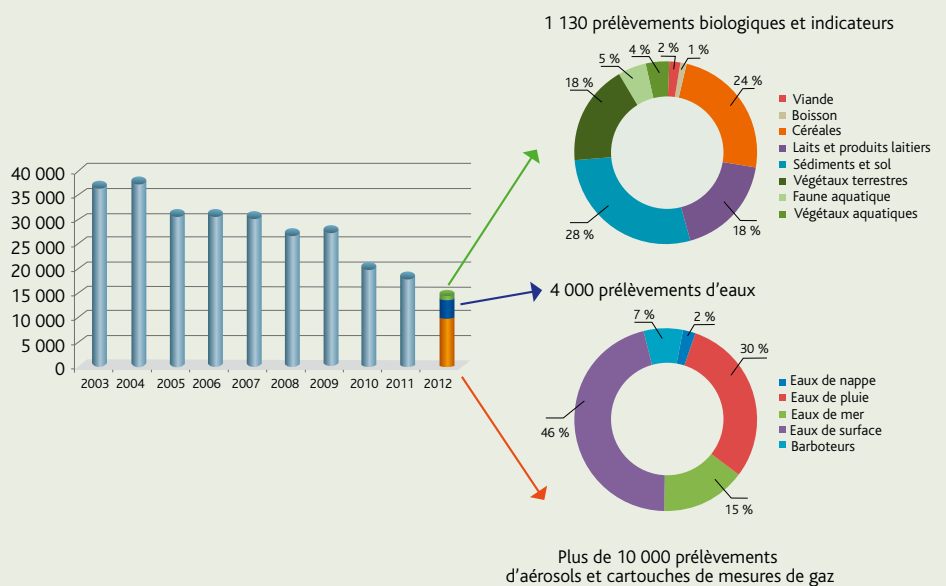
Engagée en 2009, la refonte du dispositif de surveillance par prélèvement de l'IRSN s'est focalisée sur la stratégie globale. Les prélèvements et les analyses réalisés dans le cadre de la surveillance de routine ont été significativement réduits au profit de la réalisation de constats radiologiques régionaux consistant à utiliser les méthodes les plus performantes pour établir un état de référence sur un territoire étendu. Le volet technique a également fait l'objet d'évolutions majeures portant essentiellement sur l'amélioration des performances de mesure, tant par l'utilisation de moyens de prélèvements plus efficaces que par l'optimisation des techniques métrologiques.

Au final, cette refonte s'est soldée par une diminution importante du nombre de prélèvements réalisés annuellement (figure I.12) et, inversement, par une augmentation de la proportion de résultats significatifs.

Figure I.11 - Installation d'une balise Téléray de nouvelle génération sur le mât de transmission d'une gendarmerie.



Figure I.12 - Nombre de prélèvements réalisés depuis 2003 dans le cadre de la mission de surveillance radiologique de l'IRSN et répartition par matrice des prélèvements effectués en 2012.



La surveillance du compartiment atmosphérique par prélèvement

La surveillance des aérosols atmosphériques : le réseau Opera-Air

Le réseau de surveillance de la radioactivité des aérosols Opera-Air comprend 48 dispositifs de prélèvement répartis sur le territoire français. Leur distribution géographique répond à une stratégie d'implantation liée à la surveillance des installations nucléaires en champ proche et plus largement à la surveillance générale du territoire (figure I.13).

Trois types de dispositifs coexistent dans le réseau actuel :

- Des appareils à très grand débit de prélèvement (700 m³/h) permettant de quantifier le bruit de fond ambiant pour des radionucléides présents en très faibles quantités dans l'air (le césium 137 par exemple) (figure I.14). La quantité importante d'aérosols prélevée et la métrologie de pointe mise en œuvre permettent d'atteindre de très bas niveaux de détection et de mesurer des traces de césium 137 infinitésimales (< 0,1 µBq/m³).
- Des préleveurs bas débit (8 m³/h) dont une majorité est positionnée à proximité des installations nucléaires, préférentiellement sous les vents dominants. Les autres préleveurs sont répartis de manière homogène sur l'ensemble du territoire. L'objectif de ces dispositifs est de contribuer à la détection et au suivi de situations accidentelles (Tchernobyl, Algésiras...).
- Depuis fin 2012, l'IRSN a entrepris la rénovation du parc de préleveurs bas débit par des appareils disposant d'un débit de prélèvement dix fois plus important (80 m³/h), réglé et équipé d'un dispositif de réchauffage du filtre diminuant

ainsi les phénomènes de colmatage (figure I.15). Grâce à ces évolutions, la période de filtration a pu être allongée à une semaine et, par conséquent, la limite de détection a été diminuée d'un facteur 10. Ces préleveurs, également munis d'un dispositif de piégeage de l'iode, ont été choisis afin de détecter les événements de faible impact tels que les retombées de l'accident de Fukushima sur le territoire français. D'ici fin 2015, l'ensemble du parc sera entièrement renouvelé.

Le réseau environnemental de dosimètres RPL

Développé à partir de 1985, le réseau de dosimètres environnementaux permet d'effectuer la surveillance de la dose externe due au rayonnement gamma ambiant. Après vingt ans de fonctionnement, l'IRSN a entrepris en 2011 de faire évoluer techniquement et stratégiquement ce réseau. Une collaboration a été initiée avec le laboratoire de dosimétrie de l'IRSN (LDI), visant au remplacement de l'ancien système de mesure, basé sur la thermoluminescence (DTL), par un système plus performant basé sur la radio photo luminescence (RPL) déployé par cette unité pour le suivi de la dosimétrie des travailleurs.

Le déploiement des nouveaux équipements a débuté en 2012 par l'implantation d'un dosimètre RPL (figure I.16) dans chaque ville de plus de 10 000 habitants, conduisant à conserver 150 points sur les 900 que comptait initialement l'ancien réseau DTL. À terme, l'IRSN disposera ainsi d'environ 500 points de surveillance, complément idéal du réseau Télé-ray.

En parallèle à ce redéploiement, un projet est en cours afin d'exploiter les données des dosimètres témoins transmis par le LDI. Chaque client recevant nominativement un dosimètre RPL se voit également attribuer un dosimètre témoin devant

Figure I.13 - Localisation des balises du réseau Télé-ray, des dispositifs de prélèvement d'aérosols du réseau Opera-Air et des dosimètres environnementaux radio photo luminescents (RPL) de l'IRSN.

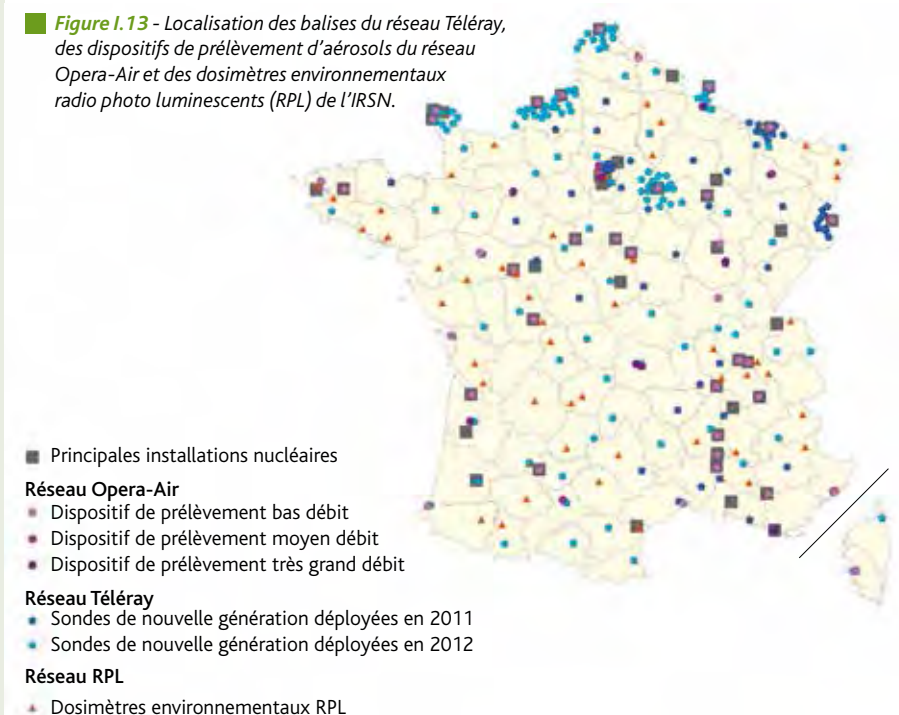


Figure I.14 - Dispositif de prélèvement très grand débit (700 m³/h) de l'IRSN.



Figure I.15 - Nouveau dispositif de prélèvement moyen débit (80 m³/h) de l'IRSN.



être installé dans un endroit exposé aux seuls rayonnements naturels. Répartis sur l'ensemble du territoire national, ces derniers représentent plus de 20 000 mesures trimestrielles et constituent ainsi une importante source de données mise à jour régulièrement.

Le réseau de surveillance des eaux de pluie

Le lessivage de l'atmosphère par les pluies provoque la précipitation sur le sol des radionucléides de l'atmosphère. Le dispositif actuel de collecteurs d'eaux de pluie (figure 1.17) dans l'environnement, en dehors de l'influence directe des installations nucléaires, compte dix stations (figure 1.18). Les installations nucléaires sont surveillées via un réseau de collecteurs, disposés sous les vents dominants, où l'eau de pluie est collectée à une fréquence hebdomadaire et mesurée mensuellement. Depuis 2010, les eaux de pluie collectées mensuellement sur le territoire français, en dehors de celles collectées à proximité des installations nucléaires, constituent un réseau dormant de la surveillance. Elles ne sont analysées qu'en cas d'incident.

La surveillance du milieu continental par prélèvement

La surveillance des denrées

L'état radiologique des zones non influencées par les rejets d'installations nucléaires est établi à partir de mesures de très bas niveau, réalisées lors d'études spécifiques ou de constats radiologiques. En complément, une veille régulière des denrées (*a minima* annuelle) est réalisée à l'échelle départementale. Depuis 2009, un réseau de préleveurs de productions végétales et animales a été déployé par l'IRSN sur l'ensemble du territoire avec la contribution des services déconcentrés de la Direction générale de l'alimentation (DGAL) et de la Direction générale de la concurrence, de la

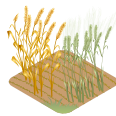
consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF), permettant également de renforcer si besoin la surveillance d'une zone géographique.

Cette veille radiologique concerne principalement le lait et les céréales qui font l'objet d'un suivi depuis le début des années 1960 et permettent de disposer de chroniques relatives aux retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl ainsi qu'à leur rémanence. Elle concerne également les légumes-feuilles pour leur capacité de captation des retombées potentiellement contaminées. En outre, quelques échantillons de champignons issus des zones les plus marquées par les retombées de l'accident de Tchernobyl, sont périodiquement analysés pour déterminer leur teneur en césium 137.



Le lait

En complément de la collecte de lait effectuée dans des fermes situées à proximité des installations nucléaires, des échantillons provenant de coopératives ou de centres laitiers permettent d'acquérir des valeurs de référence représentatives de la production laitière départementale d'origine bovine, caprine ou ovine, et d'assurer une veille sanitaire à l'échelle du territoire français. La fréquence de prélèvement, annuelle par défaut, peut être augmentée en cas d'évènement radiologique.



Les céréales

La surveillance radiologique du blé en métropole est assurée grâce à la contribution de France Agrimer qui prélève des échantillons provenant de 210 silos répartis sur l'ensemble du territoire. Ces échantillons sont ensuite regroupés en 21 mélanges régionaux. Cette surveillance régionale complète celle également réalisée aux abords des principales installations nucléaires.

■ Figure 1.16 - Dosimètre RPL environnement installé sur le site de Cadarache.



■ Figure 1.17 - Récupération d'un échantillon d'eau de pluie près d'un collecteur.



■ Figure 1.18 - Localisation des collecteurs d'eau de pluie sur le territoire français métropolitain.





Les légumes-feuilles

Les salades, choux, épinards sont prélevés régulièrement à proximité des installations surveillées. Les feuilles de ces légumes constituent la partie comestible et présentent l'intérêt d'être de bons capteurs de radionucléides atmosphériques.



Les champignons

Les champignons font partie des rares denrées produites en France dans lesquelles le césium 137 issu des retombées anciennes est encore très régulièrement mesurable. Ponctuellement, des prélèvements de champignons sont effectués préférentiellement sur les zones où ces retombées ont été les plus importantes.

Enfin, d'autres prélèvements (vins, fruits, légumes, viandes, gibiers) viennent ponctuellement compléter le dispositif de surveillance mis en place annuellement.

La surveillance des fleuves et des rivières

Pour la surveillance des rivières et des fleuves, un dispositif d'une trentaine d'hydrocollecteurs (figure 1.19) permettant des prélèvements semi-automatisés est déployé sur l'ensemble du territoire. Cette surveillance est complétée par le dispositif automatisé de télémessure Hydrotéléray.

Au niveau de chaque hydrocollecteur, l'eau du bac est pompée au rythme moyen de 15 mL par heure pour générer un échantillon d'environ 2 L tous les six jours. Les échantillons sont transmis mensuellement au laboratoire, où les fractions d'eau brute et filtrée à 0,45 µm sont analysées.

En plus des hydrocollecteurs et des points de prélèvements localisés en aval immédiat des installations nucléaires, trois stations de l'IRSN sont implantées sur des sites éloignés :

- sur la Loire, en aval des installations nucléaires, à l'usine des eaux des Ponts-de-Cé (Maine-et-Loire) ;
- sur le Rhône, en aval de toutes les installations nucléaires, au barrage de Vallabrègues (Gard) ;
- sur la Seine, en aval des installations nucléaires, à Croissy-sur-Seine (Yvelines).

La surveillance du milieu marin et littoral par prélèvement

La surveillance du milieu marin et littoral est réalisée à partir de stations côtières (figure 1.20) de prélèvements localisées sur toutes les façades maritimes du territoire (mer du Nord, Manche, Atlantique et Méditerranée). Le nombre de stations et leur implantation sont conditionnés par la volonté d'assurer une couverture géographique homogène des côtes françaises, par la proximité d'installations nucléaires et par la réalisation de programme d'études spécifiques.

Deux types de stations peuvent être distingués :

- **les stations de prélèvement sous influence des rejets des installations nucléaires implantées sur le littoral marin**, qui permettent un suivi de l'évolution spatiale et temporelle de l'état radiologique de l'environnement proche ;
- **les stations de référence** permettant la caractérisation du bruit de fond et des éventuelles sources de pollution autres que celles des rejets des installations nucléaires du littoral français. Elles permettent en particulier de surveiller les apports de radionucléides par les grands fleuves dans le domaine maritime.

Figure 1.19 - Implantations des stations Hydrotéléray et des hydrocollecteurs.



La capacité de dilution du milieu marin étant beaucoup plus importante que celle du milieu aquatique continental, la surveillance du littoral est orientée davantage vers des bioindicateurs :



Ces derniers concentrent les polluants et permettent ainsi de mieux rendre compte de l'état du milieu que certaines mesures directes dans l'eau de mer. De plus, l'analyse de certains bioindicateurs contribue à alimenter en données l'observatoire alimentaire mis en place en 2009 en partenariat avec la DGAL et la DGCCRF.

Avec l'apport de la simulation et les informations acquises durant de nombreuses années par les différents laboratoires de l'IRSN, le déploiement de cette surveillance a été optimisé avec une redéfinition globale des prélèvements (nombre de stations, fréquence, nature des échantillons) et des mesures dont certaines (tritium et césium 137 dans l'eau de mer notamment) ont fait l'objet d'améliorations significatives.

La surveillance radiologique outre-mer

Mise à part la Polynésie française qui fait l'objet d'une surveillance spécifique (*Bilan de la surveillance de la radioactivité en Polynésie française en 2012*) en raison d'un historique particulier lié à la période des essais nucléaires qui se sont déroulés sur deux atolls français du Pacifique (Moruroa et Fangataufa), les départements, territoires et collectivités d'outre-mer sont des zones hors influence d'installations nucléaires françaises. À ce titre, le plan de redéploiement de

la surveillance par l'IRSN couvre ces territoires uniquement par des moyens de télémessure ainsi que par quelques prélèvements de bioindicateurs (lait, végétaux), hors événement particulier.

Exercée depuis 1962 en Polynésie, la surveillance radiologique de l'environnement français, qui concerne sept îles (Tahiti, Maupiti, Hao, Rangiroa, Hiva Oa, Mangareva et Tubuai) représentatives des cinq archipels de la Polynésie, consiste à prélever régulièrement des échantillons de nature variée dans les différents milieux (air, eau, sol, aliments...) qui concernent la population. Le choix des sept îles retenues répond à plusieurs impératifs :

- couvrir géographiquement l'ensemble du territoire de la Polynésie française, soit presque 3 000 km d'est en ouest et 2 000 km du nord au sud ;
- tenir compte de la typologie des deux catégories d'îles : îles hautes et atolls ;
- respecter la densité démographique très hétérogène de ce territoire ;
- tenir compte de la position des deux atolls de Moruroa et Fangataufa, supports des essais nucléaires français atmosphériques de 1966 à 1974, et des vents dominants d'est, les alizés, facteurs importants quant aux trajets des retombées de ces essais ;
- retenir les îles les plus peuplées de chaque archipel : Maupiti est aussi retenue en plus de Tahiti dans la Société car c'est l'île la plus à l'ouest et Hao est retenue dans les Tuamotu en plus de Rangiroa compte-tenu de l'étendue de cet archipel et en raison de sa plus grande proximité des sites d'essais.

En ce qui concerne les denrées, les échantillons analysés sont représentatifs de la ration alimentaire des Polynésiens vivant dans les cinq archipels de ce territoire, et proviennent du

■ **Figure I.20** - Implantation des principales stations de surveillance du milieu marin et littoral.



© IRSN

■ **Figure I.21** - Station Opera-Air (très grand débit) de l'IRSN sur l'île de Tahiti.



milieu marin de pleine mer, du milieu marin lagunaire et du milieu terrestre. La quasi-totalité des échantillons prélevés sont mesurés au laboratoire d'étude et de suivi de l'environnement de l'IRSN, implanté sur l'île de Tahiti à Vairao (figure 1.21), quelques échantillons étant mesurés au laboratoire d'Orsay de l'Institut.

La surveillance radiologique renforcée de l'environnement mise en place en Polynésie suite à la catastrophe de Fukushima s'est poursuivie en 2012 dans le domaine marin. Les mesures réalisées tout au long de l'année confirment l'absence de contamination des eaux polynésiennes par celles provenant du Japon.

Les réseaux collaboratifs de l'IRSN

Pour assurer sa mission de surveillance, l'IRSN déploie un réseau matériel de moyens de mesure et de prélèvement. Pour accueillir ses stations de mesure de prélèvement automatisé (hydrocollecteur) ou réaliser des prélèvements, l'Institut s'appuie sur un réseau relationnel dense, professionnalisé et implanté sur l'ensemble du territoire national.

Parmi les acteurs impliqués dans la surveillance de l'environnement réalisée par l'IRSN figurent notamment les principaux exploitants des sites nucléaires français, des organismes institutionnels ou étatiques ainsi que des forces armées (figure 1.22).

Ce réseau permet de garantir l'efficacité d'une surveillance réactive et adaptable en cas de crise radiologique.

1.4 COMMENT MESURE-T-ON LA RADIOACTIVITÉ ?

Pour assurer sa mission de surveillance, l'IRSN analyse chaque année environ 15 000 prélèvements de natures différentes. Pour comprendre le processus qui mène du prélèvement au résultat, la figure 1.23 résume les principales étapes menant à la quantification de la radioactivité présente dans un échantillon d'eau de surface, depuis la planification du plan d'échantillonnage jusqu'à la mesure des échantillons collectés.

Ces différentes étapes, parfois très complexes, impliquent la mise en œuvre de plusieurs laboratoires de l'IRSN qui permettent de réaliser au meilleur niveau de qualité tout ou partie des étapes conduisant à la caractérisation des radionucléides présents dans un échantillon.

Figure 1.22 - Principaux partenaires concourant à la réalisation de la mission de surveillance par l'IRSN.



Figure 1.23 - Les étapes de la surveillance radiologique des eaux.



1 Planification - Préparation

Afin d'assurer sa mission de surveillance, l'IRSN prévoit un plan annuel incluant la réalisation de 4 000 prélèvements d'eaux par ses propres moyens et avec ses partenaires.



5 Traitement

Selon les types d'analyses prévues, l'échantillon est prétraité (filtration, acidification, etc.) et conditionné selon des protocoles spécifiques.



2 Prélèvement

Les prélèvements sont assurés par des dispositifs automatisés permettant d'échantillonner le milieu à surveiller sur une longue durée, ou par des équipements manuels permettant un prélèvement ponctuel.



6 Conservation

Des aliquotes sont conservés en chambre froide jusqu'à validation des résultats de mesure. Ils permettent d'effectuer de nouvelles mesures ou des mesures complémentaires si nécessaire.



3 Conditionnement

Chaque prélèvement fait l'objet d'un soin particulier pour son conditionnement (réfrigéré et à l'abri de la lumière) et son transport, jusqu'aux laboratoires de l'IRSN où il sera traité puis analysé.



7 Chimie séparative

Après la phase de traitement, l'échantillon subit des étapes de traitement radiochimique dont l'objectif est de concentrer ou de séparer, pour les mesurer, les éléments radioactifs recherchés.



4 Contrôle - Enregistrement

La vie de l'échantillon au laboratoire débute par une phase de contrôle de son état et des informations le concernant. Ces données sont enregistrées afin de garantir la traçabilité tout au long du processus de traitement et d'analyse.



8 Mesure

L'échantillon est enfin analysé sur différents types de « compteurs » spécifiques aux mesures demandées. Les résultats sont enregistrés dans la base de données afin de permettre leur validation puis leur exploitation.

Préparation des échantillons

La mesure de la radioactivité sur un échantillon prélevé dans l'environnement débute par sa préparation physique. Celle-ci va du simple conditionnement en récipient de forme normalisée à une préparation plus élaborée comme le séchage, la calcination ou la lyophilisation (figure 1.24).

D'une manière générale, les différentes techniques de traitement des échantillons visent à concentrer un maximum de radioactivité dans un minimum de volume afin de pouvoir détecter la présence de radionucléides à très bas niveaux. Dans certains cas, la concentration de l'échantillon est effectuée au moment de son prélèvement (aérosols, matières en suspension).

Les différents types de traitement appliqués aux échantillons sont présentés dans le tableau 1.5.

Dans la plupart des cas, l'analyse ne nécessite pas d'utiliser l'intégralité de l'échantillon. Celui-ci est alors homogénéisé (figure 1.24) préalablement afin que la prise pour essai n'induisse pas de biais sur la représentativité de la mesure. Une partie des échantillons analysés (filtres pour les aérosols, cendres issues des échantillons solides calcinés) est archivée en vue d'une éventuelle analyse ultérieure par des moyens complémentaires ou plus performants.

Mesures physiques

Les rayonnements issus de la radioactivité ne sont pas directement perceptibles. Les principales méthodes de détection sont fondées sur le fait qu'un rayonnement crée des ionisations (arrachements d'électrons aux atomes) et des excitations (transmission d'une quantité d'énergie aux atomes qui passent ainsi d'un état fondamental à un état excité), et donc laisse une trace au sein même de la matière. En détectant et en dénombrant ces ionisations ou ces excitations, il est possible de quantifier l'activité de l'échantillon analysé et l'énergie transmise par le rayonnement à la matière. Cette énergie est caractéristique du radionucléide émetteur.

Le principe des trois grands types de détecteurs les plus couramment utilisés (les compteurs à gaz, les scintillateurs et les semi-conducteurs) est le même : ils convertissent en un signal électrique les photons ou les électrons créés par le rayonnement.

Plus d'informations sur l'atome, les rayonnements et la mesure de la radioactivité : consulter ou télécharger le *Bilan de l'état radiologique de l'environnement 2010-2011* (chapitre X – Comprendre la radioactivité) sur www.irsn.fr.

Figure 1.24 - Principaux traitements physiques appliqués à la préparation des échantillons solides.



Dessiccation par étuvage



Lyophilisation

Tableau I.5 - Synthèse des types de traitement appliqués aux échantillons et de mesures habituellement réalisées.

Échantillon	Préparation	États de l'échantillon	Mesures réalisées
Air/aérosols	-	Filtre Cartouche (piège à iode)	Spectrométrie gamma Comptages globaux (α , β) Uranium isotopique par ICP-MS (spectromètre de masse couplé à un plasma inductif)
Eaux de pluie Eaux de mer Eaux de surface Eaux souterraines	Homogénéisation Mélange Filtration Evaporation	Eau brute Eau filtrée Matières en suspension	Tritium Spectrométrie gamma Spectrométrie alpha Comptages globaux (α , β) Strontium 90 Uranium isotopique par ICP-MS (spectromètre de masse couplé à un plasma inductif)
Sols Matières en suspension Sédiments	Séchage Broyage Homogénéisation Calcination	Produits frais Produit sec Cendres	Spectrométrie gamma Spectrométrie alpha Strontium 90 Carbone 14
Productions végétales Céréales Algues	Séchage Lyophilisation Broyage Homogénéisation Calcination	Produits frais Produit sec Produit lyophilisé Phase liquide Cendres (sauf lait)	Spectrométrie gamma Spectrométrie alpha Tritium (libre, lié) Strontium 90 Carbone 14
Lait	Homogénéisation		
Poissons Crustacés Mollusques	Séparation de la chair Séchage Lyophilisation Broyage Homogénéisation Calcination		



Broyage et homogénéisation



Calcination

L'IRSN dispose d'une plate-forme technique (laboratoires de chimie et laboratoires de mesure) et d'un parc d'environ 300 instruments de mesure (spectrométrie gamma, spectrométrie alpha, compteurs proportionnels, scintillation liquide, spectrométrie de masse...) permettant la caractérisation de l'ensemble des radionucléides d'origine naturelle (^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{228}Th , ^{230}Th , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Po , ^{210}Pb ...) ou artificielle (^{244}Cm , ^{241}Am , ^{241}Pu , $^{239-240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{129}I , $^{89-90}\text{Sr}$, ^{63}Ni , ^{55}Fe , ^{14}C , ^3H ...).

Chaque année, l'IRSN réalise plus de 15 000 mesures sur des échantillons de toute nature provenant en majorité des activités de surveillance de l'IRSN. La palette des compétences métrologiques mises en œuvre pour la mesure de la radioactivité dans l'environnement peut se résumer comme suit :

- mesures alpha et bêta globales ;
- mesure du ^{226}Ra (figure I.25) ;
- mesure des émetteurs bêta (^3H , ^{14}C , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{241}Pu , ^{210}Pb ...) ;
- mesure des émetteurs de rayonnements gamma naturels ou artificiels (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co , ^{125}Sb , ^{131}I , ^{129}I , ^{40}K , ^7Be , ^{210}Pb , ^{234}Th , ^{214}Pb , ^{222}Rn ...) (figure I.26) ;
- mesure des émetteurs alpha (plutonium, ^{241}Am , ^{244}Cm , uranium, thorium, ^{210}Po) ;
- mesure des éléments stables (K, Na, Ca, Fe, Sr, Ni, Pb).

La qualité des mesures effectuées est assurée par l'utilisation de traceurs ou de sources étalons de référence spécifiques en termes d'activité, de densité et de nature, et réalisés au sein de l'Institut. L'IRSN dispose d'un laboratoire d'étalonnage qui assure la préparation de ces sources étalons de travail pour la métrologie des radionucléides, en soutien de ses activités propres, mais aussi pour des laboratoires extérieurs à l'Institut.

Les laboratoires de l'IRSN sont accrédités par le Comité français d'accréditation (Cofrac) selon la norme ISO/CEI 17025 (Essais) et comme organisateurs d'essais interlaboratoires selon la norme ISO/CEI 17043.

Essais interlaboratoires et appui technique des pouvoirs publics

L'IRSN intervient dans le processus d'agrément des laboratoires au Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM) en application de la décision ASN n° 2008-DC-0099. Dans ce cadre, il organise (préparation des échantillons, étude de stabilité, envoi des échantillons,

Figure I.25 - Analyse du radium 226 par la méthode d'émanométrie.



© Olivier Seignette/Mikaël Lafontan/IRSN

Figure I.26 - Salle de spectrométrie gamma à bas bruit de fond de l'IRSN.



© IRSN

détermination des valeurs assignées associées par mesurage, traitement des résultats des participants et élaboration du rapport) les divers essais de comparaison interlaboratoires (figure I.27) prévus chaque année (environ cinq par an) selon un programme quinquennal couvrant 17 catégories d'analyses radioactives et six familles de matrices environnementales. Les résultats de chaque essai sont transmis aux participants et aux membres de la Commission d'agrément de ces laboratoires sous un délai de 14 semaines.

L'IRSN est désigné par la Direction générale de l'alimentation (DGAL) du ministère de l'Agriculture, « Laboratoire national de référence radionucléides » dans le domaine de la santé publique vétérinaire et de la protection des végétaux (LNR RN). Dans ce cadre, il est en charge de l'animation technique du réseau des laboratoires agréés et de l'organisation, chaque année, d'un essai interlaboratoires d'aptitude à l'attention de ces laboratoires.

L'IRSN assure également une mission d'appui technique des pouvoirs publics sur les thématiques liées à la mesure de la radioactivité dans l'environnement. L'Institut rend des avis techniques à l'Autorité de sûreté nucléaire et à la Direction générale de la santé concernant les dossiers des laboratoires demandant l'agrément pour effectuer des mesures de

radioactivité au titre du contrôle sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine en application du Code de la santé. En lien avec ce sujet, l'IRSN a réalisé en 2012, à la demande de ces deux autorités, une étude sur la qualité radiologique des eaux conditionnées produites en France (142 eaux de source et minérales naturelles ont été analysées).

R&D appliquée aux besoins de la surveillance de la radioactivité dans l'environnement

En parallèle des activités directement liées à la réalisation des programmes de surveillance de la radioactivité dans l'environnement, l'IRSN mène des activités de recherche et de développement de nouvelles méthodes de prélèvement, de traitement et de mesure avec pour principaux objectifs :

- l'amélioration de l'efficacité des dispositifs de prélèvement ;
- la mise au point de méthodes de prélèvement, de traitement et d'analyses « rapides », de laboratoire ou de terrain, utilisables notamment en cas de crise radiologique ;
- l'amélioration des limites de détection des radionucléides présents en faible quantité dans les matrices environnementales.

Figure I.27 - Préparation d'échantillons pour un essai interlaboratoires.



© IRSN

Développement de préleveurs passifs pour la surveillance du tritium atmosphérique

En vue de compléter les moyens actuels de surveillance du tritium atmosphérique (barboteurs et, plus récemment, condenseurs), l'IRSN développe depuis 2012 un système de piégeage passif de tritium sous forme vapeur d'eau (HTO) par un média adsorbant. Outre sa compacité et son faible coût, il permet de s'affranchir des inconvénients d'un prélèvement nécessitant un apport d'énergie pour être mis en œuvre. Ce dispositif de prélèvement est composé d'un réservoir, avec une géométrie spécifique brevetée (figure 1.28), rempli avec un tamis moléculaire (zéolithe). Les tests, réalisés en laboratoire dans le banc de tests de la plateforme d'études du tritium atmosphérique (Petra) et sur le terrain en zone influencée par des rejets, indiquent une excellente corrélation des résultats obtenus avec les autres dispositifs existants. Le champ d'application ouvert par ces dispositifs passifs touche la surveillance radiologique de l'environnement en routine comme en cas d'accident.

Développement de DGT pour la surveillance de l'uranium dans l'eau

Classiquement employés pour l'analyse quantitative des métaux dans les milieux aquatiques, des *Diffusive gradient in thin film* (DGT) sont développés à l'IRSN afin de les utiliser pour la surveillance de la teneur en uranium dans les cours d'eaux. Les DGT utilisent le principe d'accumulation de métaux sur un composé chélatant², après leur diffusion à travers une couche de gel. L'accumulat est ensuite analysé par ICP-MS (spectromètre de masse couplé à un plasma inductif).

2 - Chélatant : la chélation est un processus physico-chimique au cours duquel est formé un complexe entre un ligand (ou chélatant) et un cation métallique.

Les premiers résultats de l'étude, débutée en 2012, indiquent que le DGT présente un réel pouvoir d'accumulation de l'uranium. Après définition des paramètres de dimensionnement optimum, cette capacité devrait permettre le dosage de très faibles concentrations en uranium dans le milieu aquatique et sur des durées relativement longues, offrant ainsi une alternative efficace aux moyens plus lourds (hydrocollecteurs) usuellement mis en œuvre pour la surveillance de ce radionucléide dans l'environnement.

Développements relatifs à l'amélioration des performances métrologiques

Les principaux développements actuellement en cours à l'IRSN relatifs à l'amélioration des techniques de détection sont :

- le développement de la méthode de mesure du tritium par spectrométrie de masse à partir de la recroissance de l'hélium 3 ;
- la mise en œuvre d'un scintillateur liquide gros volume pour la mesure du tritium libre ;
- le développement de systèmes anti-cosmiques pour améliorer les performances des mesures par spectrométrie gamma ;
- le développement d'un système de mesure par spectrométrie gamma en coïncidence.

Mise au point de méthodes d'analyses rapides, de terrain ou de laboratoire

Les dispositifs de spectrométrie gamma *in situ* développés par l'IRSN permettent une mesure précise de la radioactivité gamma ambiante de l'environnement. Ces mesures, associées aux mesures *in situ* existantes (Téléray, cartographie gamma mobile), fourniront un complément indispensable à une bonne caractérisation du milieu et, à ce titre, seront utilisées à terme dans le cadre des constats radiologiques régionaux.

Figure 1.28 - Prototype de préleveur passif.



© IRSN

Figure 1.29 - Système Ulysse, muni de deux détecteurs NaI de 2 litres : réalisation d'une cartographie de contamination surfacique du site IRSN du Vésinet.



© IRSN

Le système Ulysse (Unité mobile d'analyse par spectrométrie gamma embarquée), développé par l'IRSN, a également été utilisé pour la première fois au Japon lors d'une campagne de cartographie réalisée à Fukushima. Ulysse est un système mobile de mesure de rayonnements gamma, développé pour la réalisation de mesures embarquées (automobile, hélicoptère, avion). Il permet la détection des photons gamma par spectrométrie, associée à la mesure du débit de dose selon une fréquence d'acquisition élevée à des fins de cartographie de la contamination surfacique. Le système Ulysse (*figure 1.29*) présente par ailleurs une capacité de modularité très intéressante, permettant l'intégration de plusieurs détecteurs, de types différents et en nombre variés.

En ce qui concerne les méthodes d'analyses rapides en laboratoire, deux études sont actuellement en cours. La première porte sur le développement d'une nouvelle méthode rapide de mesure des strontiums 89 et 90, basée sur une séparation par chromatographie ionique et une mesure par scintillation liquide – effet Cerenkov et/ou ICP-MS. La seconde porte sur le développement d'un protocole de mesures des radionucléides, non facilement mesurables en spectrométrie gamma, via une radiochimie automatisée (séparations successives sur colonnes) et un couplage avec des dispositifs de mesure (ICP-MS...).





II

LES RÉSULTATS DE LA SURVEILLANCE DU TERRITOIRE FRANÇAIS

II.1 Introduction

II.2 Le débit de dose gamma ambiant

II.3 Le tritium

II.4 Le carbone 14

II.5 Les césiums 134 et 137

II.6 Le strontium 90

II.7 L'iode 131

II.8 Les autres produits de fission et d'activation

II.9 Les uraniums 234, 235 et 238

II.10 Les transuraniens (Am, Pu)

Le chapitre I vous a présenté les sources de radioactivité présentes sur la planète, qu'elles soient d'origine naturelle ou artificielle. Dans ce chapitre II, après un aperçu des données obtenues grâce au réseau de surveillance et d'alerte Téléray, l'intérêt se focalise sur les principaux radionucléides d'origine artificielle rejetés par les différentes installations nucléaires françaises.

II.1 INTRODUCTION

Une dizaine de radionucléides ont été sélectionnés suivant divers critères : leur présence dans les effluents gazeux ou liquides des installations nucléaires, leur relative abondance dans l'environnement liée aux rejets passés ou présents. Il s'agit des radionucléides suivants :

- le tritium ;
- le carbone 14 ;
- les césiums (134 et 137) ;
- le strontium 90 ;
- l'iode 131 ;
- les autres produits de fission (PF) et d'activation (PA) tels que les antimoinés (^{124}Sb , ^{125}Sb), le manganèse (^{54}Mn), les ruthéniums (^{103}Ru et ^{106}Ru) les Tellures (^{132}Te et $^{123\text{m}}\text{Te}$), l'argent 110m, les cobalts (^{60}Co et ^{58}Co)... ;
- les uraniums (^{234}U , ^{235}U et ^{238}U) ;
- les transuraniens (Am, Pu).

Pour chacun de ces radionucléides (ou groupe de radionucléides), sont précisées les sources artificielles, aux points de vue qualitatif et quantitatif, les principales caractéristiques chimiques et les spécificités biologiques (facilité d'incorporation dans la chaîne alimentaire et affinité pour la matière organique...). S'ils sont connus, les niveaux de référence dans les différents compartiments de l'environnement sont donnés et les résultats des données issues de la surveillance, suivant une répartition dans les différents compartiments de l'environnement, sont ensuite présentés.

II.2 LE DÉBIT DE DOSE GAMMA AMBIANT

La mesure du débit de dose gamma ambiant par le réseau Téléray

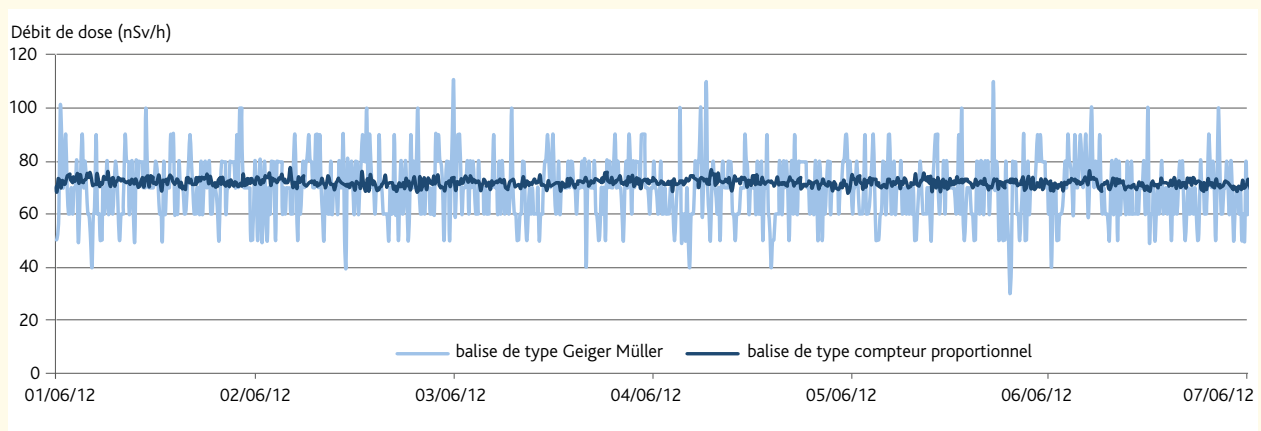
Le réseau en routine

Les balises, ancienne et nouvelle génération confondues, qui composent le réseau Téléray, mesurent en permanence (selon une fréquence de dix minutes) et sur l'ensemble du territoire français, le débit d'équivalent de dose gamma ambiant. Les sondes de type Geiger Müller (GM) du réseau initial, robustes mais aux mesures très fluctuantes, laissent désormais place à des compteurs proportionnels (CP) beaucoup plus stables et performants (*figure II.1*). Sur une même implantation, en comparant les données des deux types de balises, on observe que la dispersion des mesures du compteur proportionnel est trois fois plus faible.

Fin 2012, 100 des 107 départements et collectivités français sont pourvus d'une balise Téléray. La moyenne respective de la mesure du débit de dose gamma ambiant obtenue pour chacune des balises, sur la période juillet 2011 – décembre 2012, est présentée sur la figure II.2.

La moyenne nationale sur la période concernée est de 89 nSv/h, les données fluctuant entre 45 et 210 nSv/h.

Figure II.1 - Données de débit de dose des sondes Téléray de Marseille (nSv/h).



Ces mesures de débit d'équivalent de dose sont la résultante des mesures cumulées du rayonnement tellurique lié à la nature du sol dans l'environnement de la balise, et du rayonnement cosmique lié à l'altitude du lieu considéré.

Les données les plus faibles sont typiques du bord de mer ou des bassins sédimentaires tels que le Bassin parisien (50 nSv/h à Paris) et le Bassin aquitain (61 nSv/h en Charentes). À l'opposé, c'est dans les régions granitiques telles que la Bretagne ou le Massif central que l'on rencontre les valeurs les plus élevées avec par exemple 135 nSv/h dans le Morbihan et 140 nSv/h en Corrèze.

La moyenne la plus importante est relevée sur la balise du département de Haute-Savoie, placée sur la plateforme de l'aiguille du midi à 3 842 mètres. À cette altitude, la part relative aux rayonnements cosmiques devient très importante, ce qui explique la valeur deux fois plus élevée que la moyenne nationale.

La valeur particulièrement élevée de la balise de Montluçon, dans l'Allier, s'explique par l'influence du bâti naturellement radioactif sur lequel elle est fixée. Celle-ci sera repositionnée lors de son remplacement. Cependant, si cette valeur n'est pas représentative du niveau environnant, c'est le suivi dans le temps du signal et de son éventuelle évolution qui permet d'assurer la veille radiologique.

Le débit de dose tout au long de l'année

Le débit de dose fluctue également au cours du temps en fonction des variations climatiques.

L'exploitation puis l'interpolation de l'ensemble des données collectées par le réseau Télecay permet de réaliser une cartographie mensuelle du débit d'équivalent de dose (figure II.3, page 36) qui montre une évolution saisonnière du bruit de fond caractérisée par son augmentation d'une dizaine de nSv/h en moyenne durant les mois pluvieux et plus particulièrement dans les régions dont la radioactivité naturelle est liée aux roches constitutives du sol.

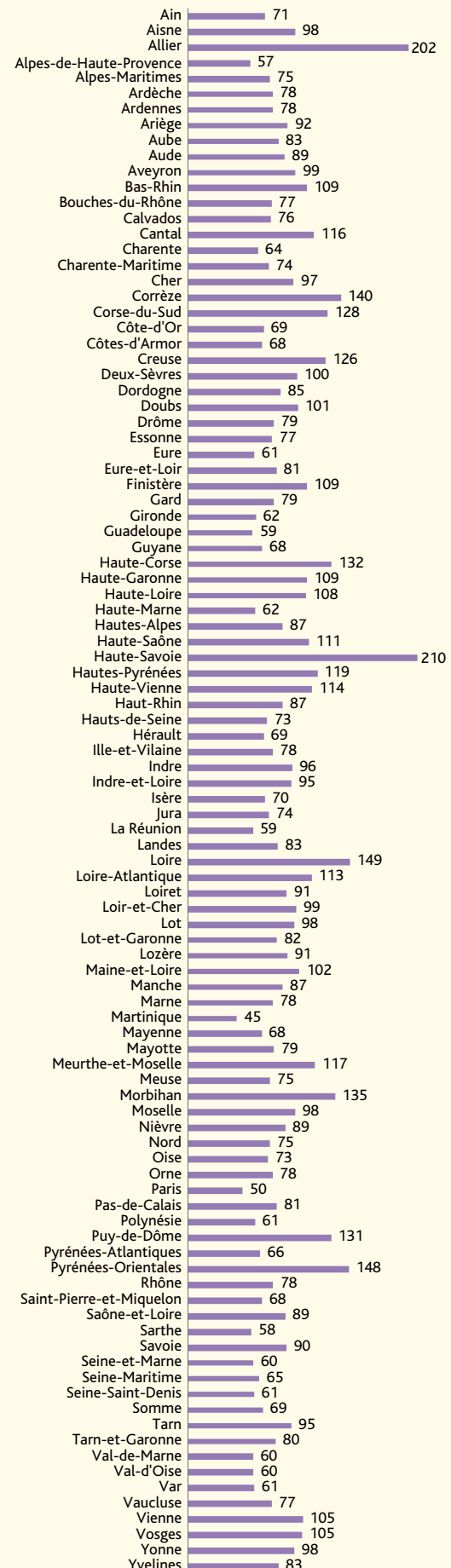
En effet, les phénomènes les plus fréquemment détectés par le réseau sont d'origine naturelle, liés aux conditions météorologiques telles que les orages. Lors de ces épisodes pluvieux, le lessivage puis la précipitation au sol des produits de filiation du radon 222 tels que le bismuth 214 et le plomb 214, émetteurs gamma, provoquent une augmentation du débit de dose gamma ambiant. Ceci est d'autant plus important que le sol est riche en éléments radioactifs naturels.

La surveillance des sites nucléaires

Fin 2012, huit centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) bénéficiaient de la nouvelle couverture du réseau Télecay. Autour de la centrale de Cattenom, dix balises ont été installées en complément du réseau de surveillance d'EDF, dans un rayon de 10 à 30 km de la centrale nucléaire.

L'étude de la chronique des valeurs mesurées par l'ensemble des balises situées autour du site nucléaire entre avril et juin 2012 montre qu'aucun lien n'existe entre la proximité du CNPE et le débit de dose mesuré. La moyenne sur cette période des données de la balise située à 1 km de la centrale sous les vents dominants est de 113 nSv/h, les valeurs minimales et maximales des balises en périphérie oscillant entre

Figure II.2 - Moyenne du débit de dose gamma ambiant par département sur la période juillet 2011 – décembre 2012 (nSv/h).



90 et 120 nSv/h (figure II.4). Cette variabilité du débit de dose existe autour des centrales nucléaires comme ailleurs, à l'instar de tout point de l'environnement en France, sans pour autant que cela soit lié à l'activité nucléaire.

Les valeurs mesurées par les différentes sondes fluctuent de manière homogène, influencées principalement par les événements climatiques tels que l'orage du 21 mai 2012 (voir précédemment).

Le réseau d'alerte

Le seuil d'alarme associé à chaque balise correspond au bruit de fond mesuré par celle-ci majoré de 50 nSv/h. Cette valeur auparavant fixée à 114 nSv/h, garantissant le respect de la limite de dose annuelle réglementaire pour la population, a évolué depuis l'accident de Fukushima. L'analyse des mesures

réalisées à Tokyo au cours de l'évènement par la balise du réseau Téléray a permis de conclure à la nécessité d'abaisser au maximum ce seuil, juste au-dessus des variations statistiques de la mesure, afin d'augmenter les probabilités de détection.

Toute valeur dépassant le seuil fait l'objet d'une validation et génère une alarme. Une répétition de deux alarmes ponctuelles, la persistance de l'alarme ou le déclenchement de deux balises d'un même regroupement géographique engendre une alerte sur le système d'astreinte de la télésurveillance.

Les événements d'origine naturelle

Les événements orageux sont particulièrement visibles à proximité des CNPE où l'importante densité de balises permet de suivre en temps réel le déplacement du phénomène (figures II.5 et II.6). Dans le cas de cet orage survenu en octobre 2012, on observe distinctement la progression nord – sud (tracé

Figure II.3 - Évolution du débit de dose sur la France métropolitaine au cours de l'année 2012 – Données du réseau Téléray (nSv/h).

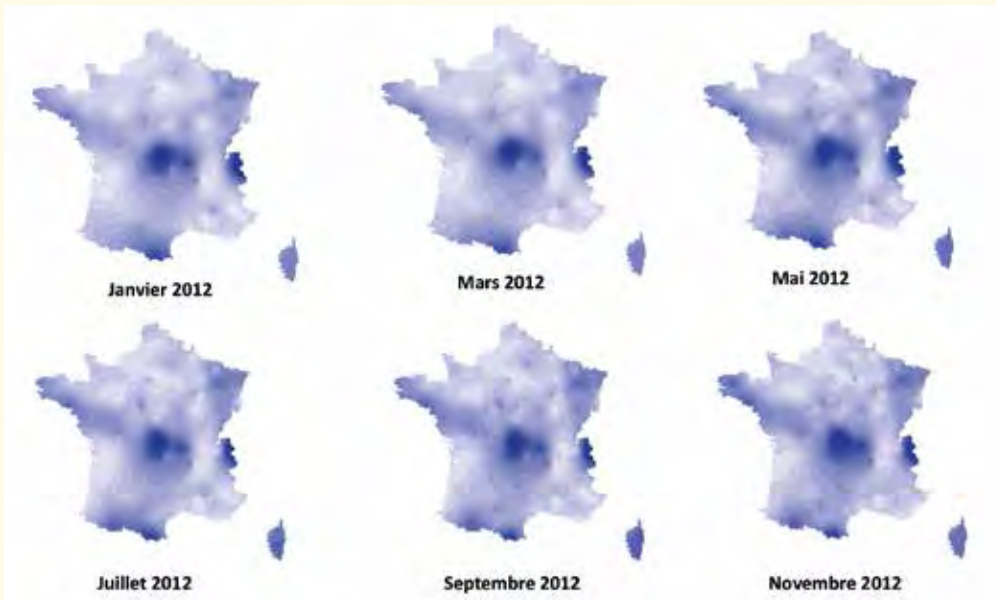
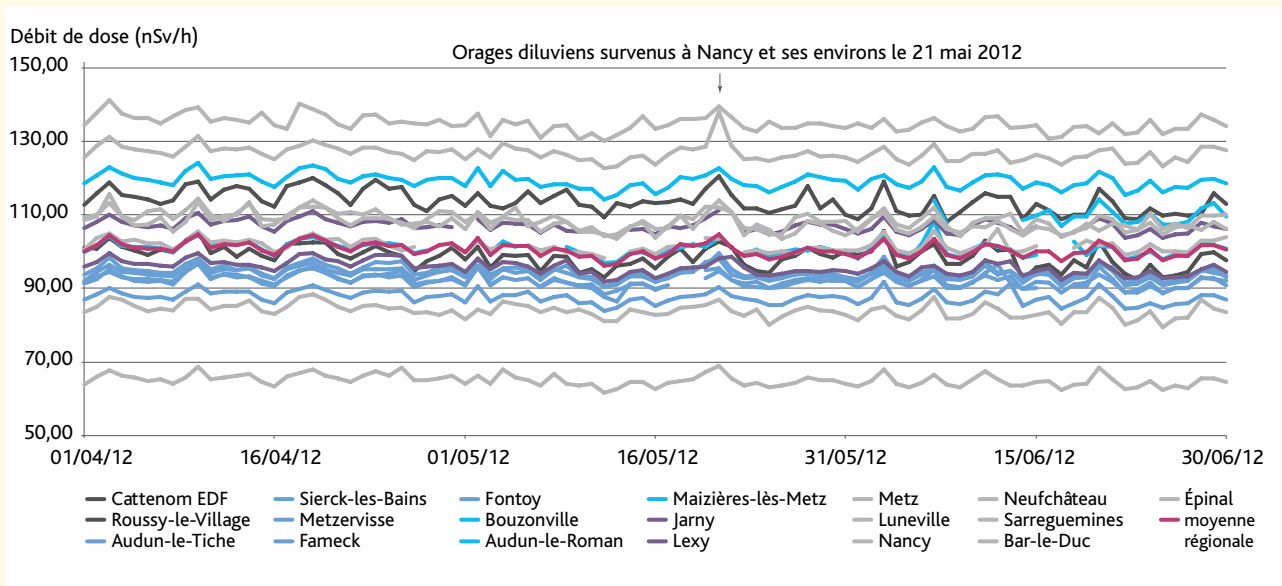


Figure II.4 - Évolution du débit de dose mesuré par le réseau Téléray autour de la centrale de Cattenom (nSv/h).



rouge sur le graphique) de la perturbation entre Strasbourg et Sierentz. Le débit de dose augmente de 100 nSv/h au plus fort de l'orage sur Strasbourg et de seulement 10 nSv/h plus au sud.

Ce type d'évènement confirme la capacité du réseau Télecay à détecter et suivre le déplacement d'une contamination atmosphérique.

Les évènements d'origine artificielle

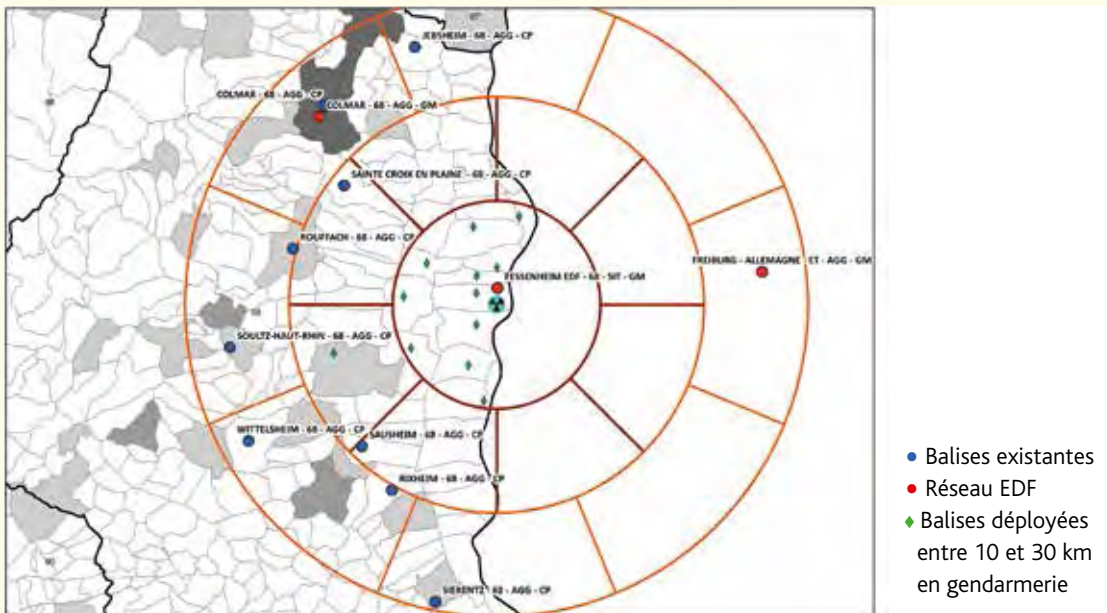
Les alarmes d'origine artificielle les plus fréquentes sont liées à l'utilisation de sources radioactives lors des étalonnages réalisés par l'exploitant à proximité des balises IRSN ou au stationnement de convois de matières radioactives aux environs des stations de mesure des CNPE.

Plus rarement, le réseau détecte des tirs de gammagraphie réalisés sur des infrastructures telles que des constructions

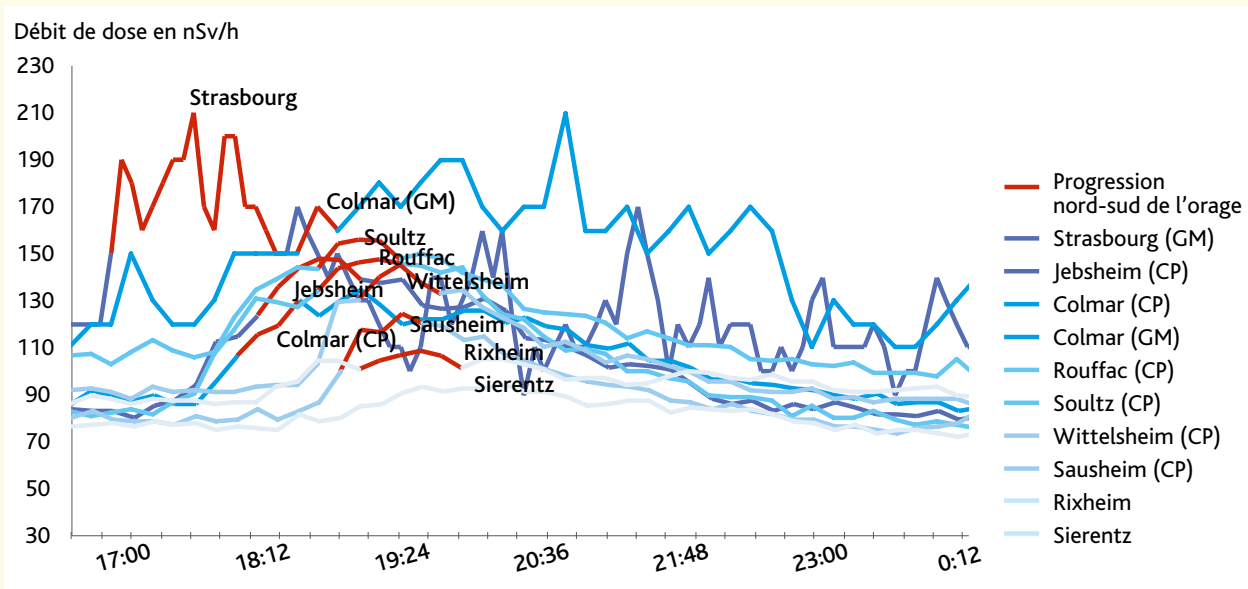
de béton ou des câbles de remontées mécaniques afin de vérifier leur intégrité.

Les deux balises situées à Beaumont-Hague et Omonville-la-Petite (figure II.7, page 38) détectent ponctuellement le krypton 85, produit de fission retenu dans l'élément combustible et qui est libéré sous forme gazeuse à l'occasion du traitement du combustible usé par l'usine de La Hague. Ce radionucléide émetteur bêta et gamma fait également l'objet d'études particulières par le laboratoire IRSN situé à Octeville. L'exploitation conjointe des valeurs de débit de dose et de l'activité volumique en krypton 85 (figure II.8, page 38) montre la parfaite corrélation des données sur la station de l'atelier nord d'Omonville-la-Petite. Plus tard, du fait du changement de direction du vent, le rejet est détecté par la balise du village de Beaumont-Hague.

■ Figure II.5 - Distribution de la surveillance du débit de dose par télémesure autour du CNPE de Fessenheim.



■ Figure II.6 - Conséquences d'un orage sur les mesures des balises en Alsace le soir du 18 septembre 2012.



Le réseau de surveillance de l'environnement par dosimètres passifs radio photo luminescents (RPL)

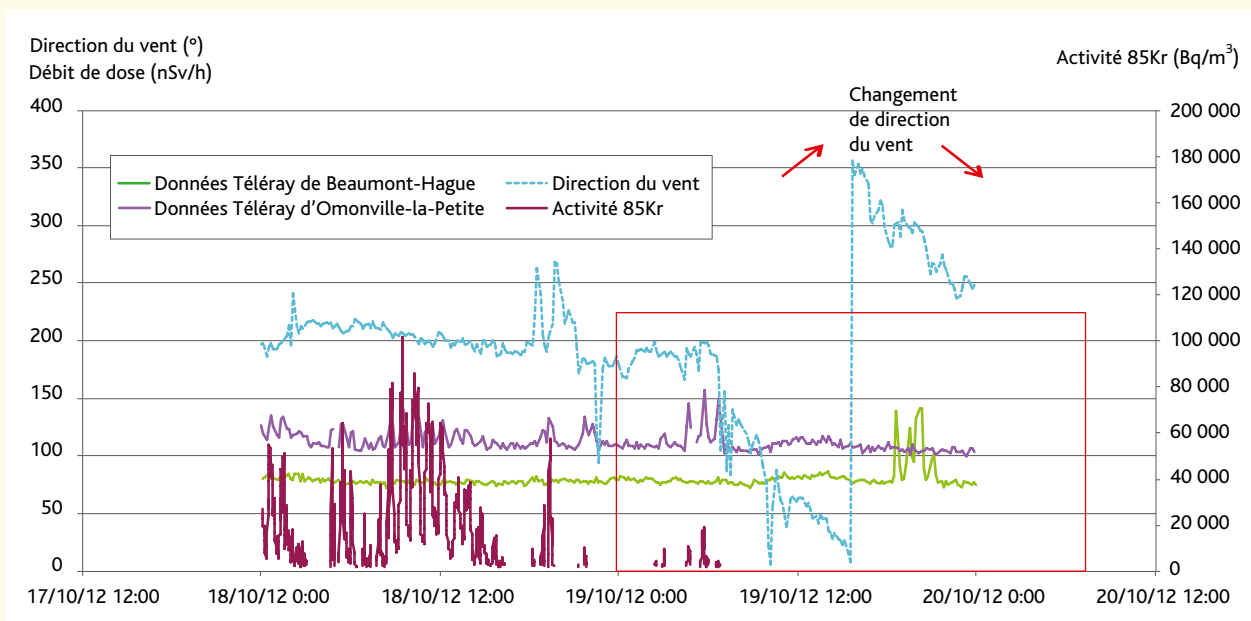
La réalisation d'une carte superposant les données des 150 dosimètres RPL déployés dans l'environnement (voir chapitre 1 : Le réseau environnemental de dosimètre RPL, page 20) et l'interpolation par krigeage des 20 000 mesures des dosimètres témoins permettent de montrer une certaine cohérence des mesures réalisées à l'intérieur et à l'extérieur du bâti (figure II. 9). Dans 10 % des cas seulement, on note un écart de plus de 30 nSv/h entre le RPL environnement et la valeur moyenne mesurée par le RPL témoin.

La carte ainsi obtenue est similaire à celles réalisées à l'aide des mesures Téléray (figure II.3, page 36) et cohérente avec la carte des roches susceptibles de présenter un fort taux de radioactivité (figure II.10), montrant ainsi la relation entre la mesure du débit de dose et le rayonnement tellurique naturel. Ceci confirme l'intérêt d'exploiter cette importante source de données, mise à jour trimestriellement et présentant une très forte densité de points sur le territoire. En parallèle, les RPL environnement seront conservés comme points de référence et permettent également un suivi temporel. En situation d'urgence, ceux-ci offrent également la possibilité d'être rapatriés à fréquence plus rapprochée afin d'évaluer l'impact de l'évènement.

Figure II.7 - Positionnement des balises Téléray autour du site Areva-NC La Hague.



Figure II.8 - Mesure d'un rejet de krypton 85 de Areva-NC La Hague par les balises Téléray et de mesure de krypton 85 de Beaumont-Hague et Omonville-la Petite.



La mesure des émetteurs gamma dans les cours d'eau avec le réseau Hydrotéléray

Les activités volumiques des eaux de rivières, surveillées par le réseau de mesure Hydrotéléray (voir chapitre I), sont restées en deçà des limites de détection pour l'iode 131, le cobalt 60 et le césium 137. La limite de détection des mesures évolue en fonction du bruit de fond naturel. La figure II.11 présente ces limites de détection pour la station d'Agen (en aval du CNPE de Golfech).

Figure II.9 - Représentation cartographique des données de mesure du débit de dose par dosimétrie passive (nSv/h).

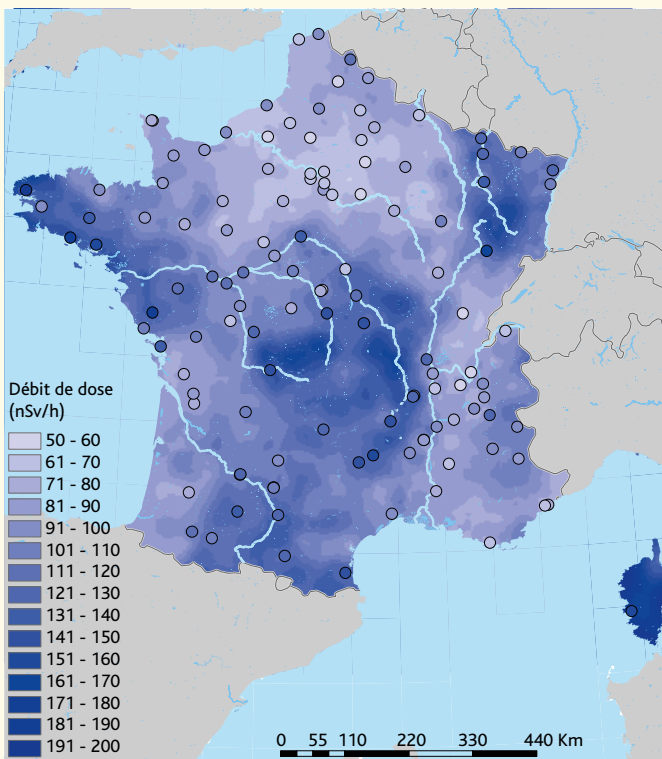


Figure II.10 - Superposition du débit de dose gamma ambiant mesuré par les RPL témoins et des principales roches influençant le rayonnement telluriques naturel (nSv/h).

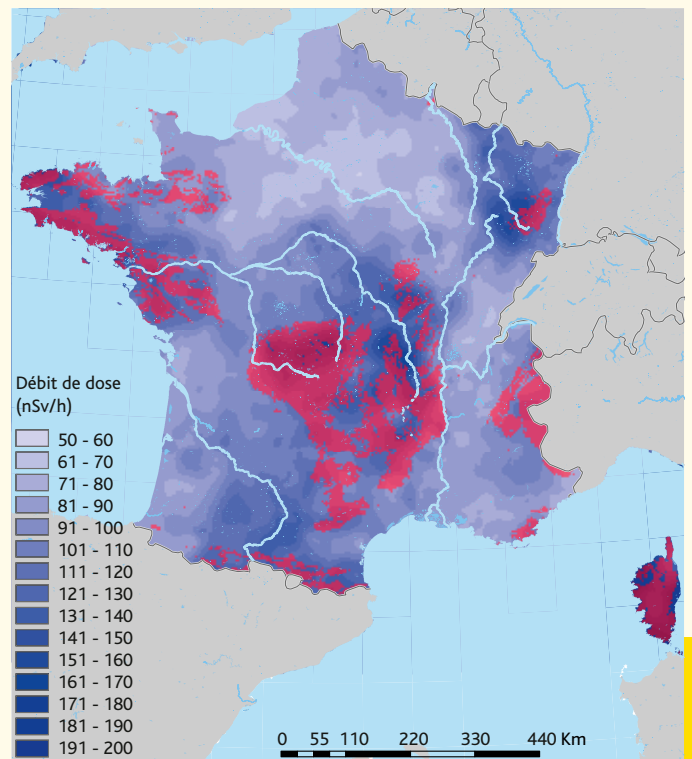
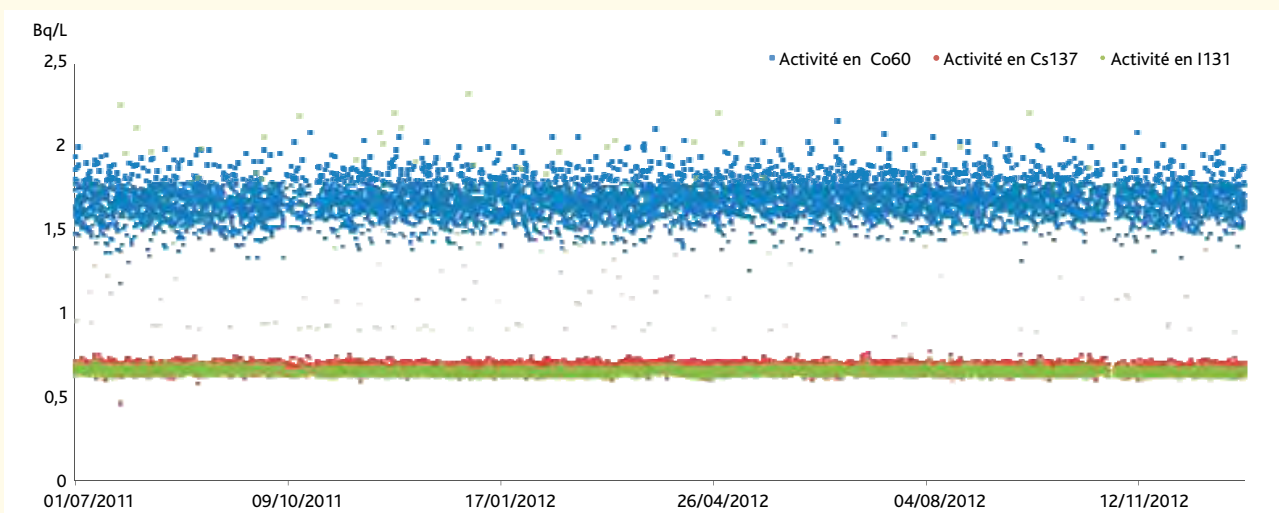


Figure II.11 - Limites de détection à la station d'Agen (Bq/L).



Focus

Les mesures aéroradiométriques avec le système Ulysse

Après plusieurs campagnes de mesure par spectrométrie gamma embarquée en véhicule, notamment au Japon en 2011, deux campagnes aéroradiométriques ont été réalisées avec le système Ulysse en 2012 sur le territoire français.

Ces campagnes avaient pour objectifs d'éprouver la faisabilité et la performance de telles mesures. En effet, l'avion permet de couvrir d'importantes portions de territoire en s'affranchissant des contraintes terrestres, cependant ce type de mise en œuvre impose la maîtrise de paramètres intrinsèques au déplacement des aéronefs tels que la hauteur relative, la détermination a priori des trajectoires, l'optimisation des temps de survol, etc.

Le premier vol a été réalisé sur un avion d'une société privée, Action Air Environnement, déjà aguerrie à ce type de mission dans le cadre d'activité d'imagerie hyperspectrale¹. Une trappe circulaire ouverte au plancher permet l'installation des détecteurs

1 - Ce que l'on appelle image hyperspectrale est en réalité toute une série d'images de la même scène, mais prises dans plusieurs dizaines de longueurs d'onde – qui correspondent à autant de « couleurs ». Une telle mesure fournit de nombreuses informations sur les propriétés physiques des objets observés. La spectro-imagerie aéroportée est ainsi d'une grande utilité pour l'étude et la surveillance de l'environnement.

au-dessus du vide. Deux zones ont été surveillées : la Camargue et le massif de l'Esterel (figure II.12). Ces régions ont été choisies pour leur diversité géologique et géographique permettant d'évaluer la réponse des détecteurs lors du changement de milieu. Lors du passage sur l'eau, seul le rayonnement cosmique influence la mesure et l'on observe une moyenne de 4 nSv/h (les détecteurs utilisés ont en effet une faible réponse métrologique au rayonnement cosmique). Sur les massifs où les formations géologiques sont naturellement radioactives, comme les rhyolithes d'origine volcanique, des débits de dose supérieurs à 400 nSv/h peuvent être mesurés. La méthode de correction des mesures brutes en fonction de la hauteur de vol a été complétée et validée par des mesures au niveau du sol.

Sur la figure II.13 apparaissent des taches vert clair (débit de dose localement supérieur à 100 nSv/h, ce qui est relativement élevé pour une mesure réalisée au niveau de la mer), correspondant au phénomène connu de dépôts radioactifs dans les sables de Camargue. Ces dépôts ont pour origine les roches granitiques riches en uranium du massif central dont l'érosion provoque la mise en solution via les affluents du Rhône de particules d'uranium et de thorium qui se déposent ensuite dans le delta du fleuve.

Cette première mission a permis ainsi de mettre en évidence la capacité de détection du système Ulysse à plus de 200 km/h et 200 mètres d'altitude, même dans un contexte de niveau radiologique environnemental naturel. L'utilisation de méthodes géostatistiques pour réaliser le post-traitement et la mise en forme des mesures corrigées, pour disposer d'un support de communication efficace et fiable, se révèle indispensable pour prendre en compte la dimension spatiale de l'analyse des données.

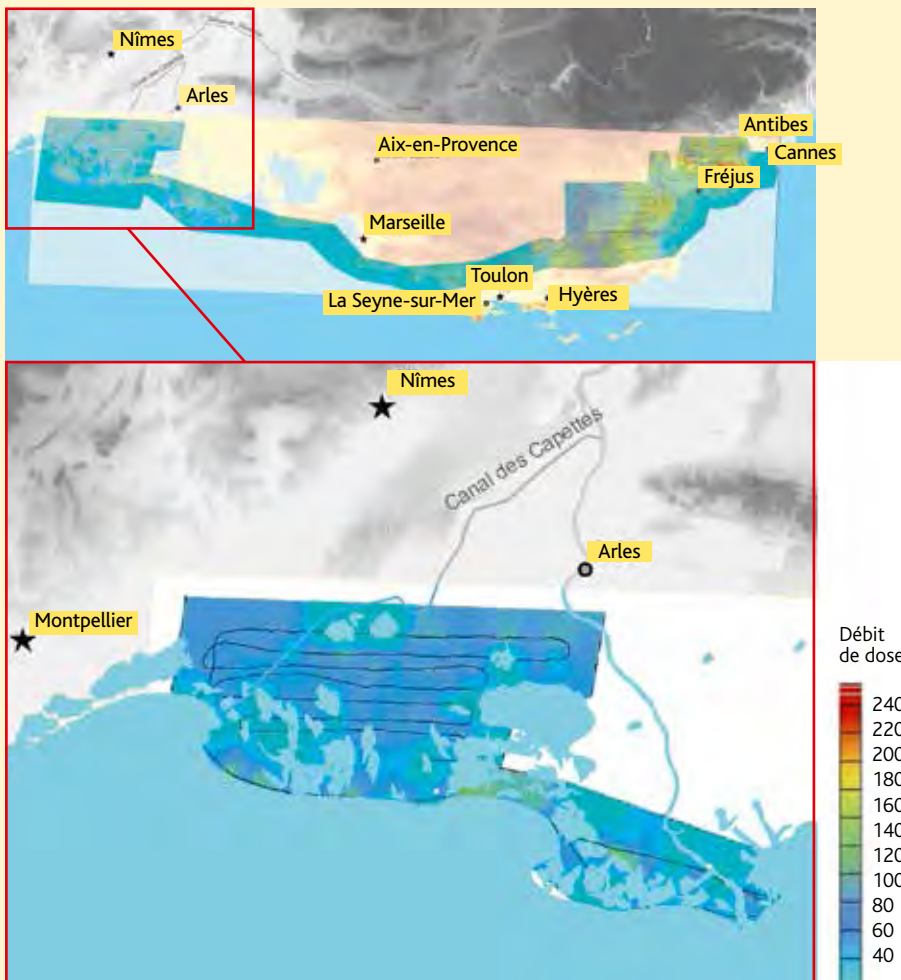


Figure II.12 - Cartographie par interpolation des mesures aéroportées corrigées à un mètre (en nSv/h).

Figure II.13 - Zoom sur la zone cartographiée en Camargue : mise en évidence de dépôts d'uranium et de thorium (taches vert clair).

II.3 LE TRITIUM

Introduction

Caractéristiques générales

Isotope radioactif de l'hydrogène, le tritium a une double origine :

- **naturelle** : il est produit en permanence par l'interaction des rayonnements cosmiques avec l'azote, l'oxygène et l'argon de l'air ;
- **artificielle**, que ce soit par les essais nucléaires, les centres liés à la Défense (le tritium entre dans la fabrication de l'arme nucléaire), la production d'électricité ou le retraitement de combustibles irradiés.

La caractéristique fondamentale du tritium (^3H) est son extrême propension à s'échanger avec son isotope stable (^1H) et réciproquement. De fait, il suit le cycle de l'eau et s'incorpore à l'eau et à la matière organique de tous les organismes vivants.

Dans l'**atmosphère**, il est principalement sous forme d'eau tritiée liquide ou vapeur (HTO), d'hydrogène tritié (HT) et secondairement de méthane tritié (CH_3T) ; ces deux dernières formes n'étant pas directement incorporables par les organismes vivants, elles n'ont pas d'influence sur les concentrations mesurées dans ces derniers.

Dans les **eaux** (milieu marin ou eaux douces), le tritium se trouve essentiellement sous forme d'eau tritiée et peut être associé aux particules organiques des matières en suspension.

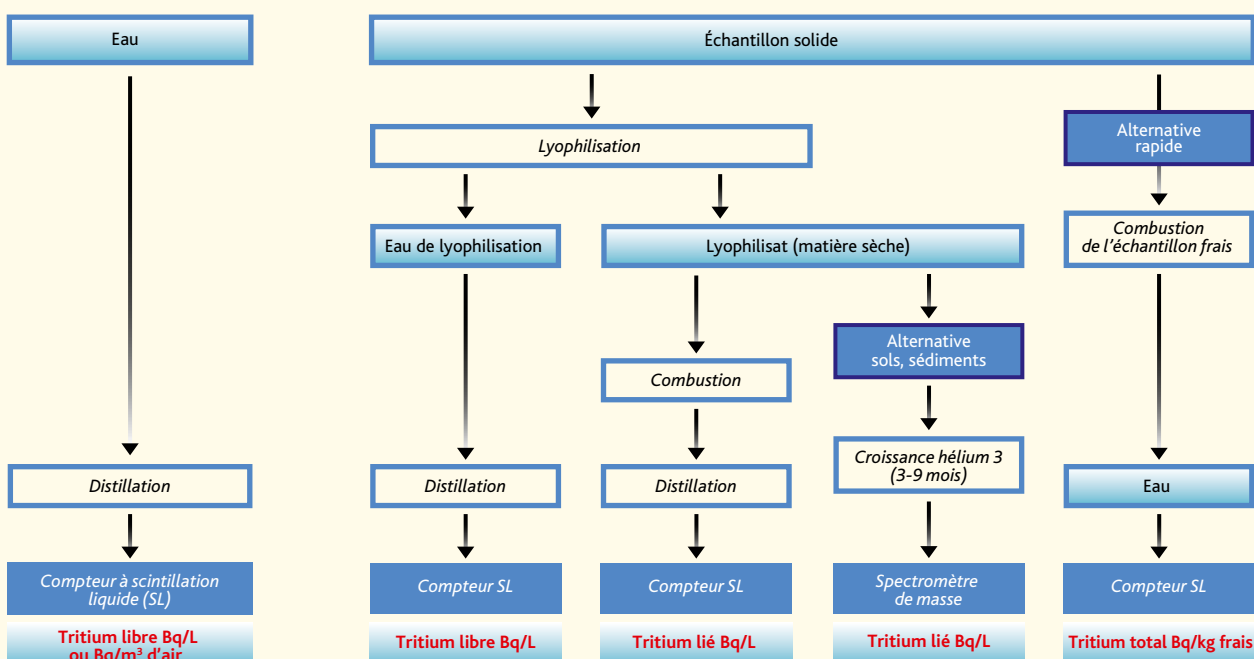
Dans les **organismes vivants**, le tritium se trouve sous forme de tritium organiquement lié (TOL) et d'eau tritiée

qualifiée dans ce cas de tritium libre (HTO). Dans le végétal, la vapeur d'eau tritiée s'échange par voie foliaire. Une partie du tritium est incorporée dans la matière organique des végétaux. L'intensité de l'incorporation sous forme TOL dépend de tous les paramètres qui influent sur la photosynthèse, en particulier la saison, avec un maximum lors de la phase de croissance au printemps-début d'été et une diminution puis un arrêt à l'automne et l'hiver. Plusieurs processus aboutissent à l'incorporation du tritium dans l'organisme des animaux : l'absorption de vapeur d'eau par inhalation et passage à travers la peau et l'ingestion (nourriture et abreuvement). La majorité du tritium incorporé est éliminée du corps des animaux avec une demi-vie biologique de quelques jours à quelques centaines de jours. Dans les organismes, le tritium libre (HTO), exprimé en Bq/L d'eau de dessiccation, donne une image de l'activité volumique dans l'échantillon au moment du prélèvement ; le tritium organiquement lié (TOL), exprimé en Bq/L d'eau de combustion, fournit une information rétrospective sur le niveau moyen du tritium ambiant (vapeur d'eau, eau, molécules organiques entrant dans la chaîne trophique) sur toute la période de formation de la matière organique.

Les sédiments et les sols ne sont généralement pas à l'équilibre avec leur milieu ambiant (accumulation au cours du temps de matières organiques dont la concentration en tritium a varié au fil du temps).

Différentes méthodes d'analyses, plus ou moins rapides selon les matrices, permettent de mesurer le tritium sous ses diverses formes, avec des limites de détection variables (figure II.14). Dans la plupart des cas (outre la méthode par recroissance), l'analyse consiste à mesurer le tritium par scintillation liquide (SL – figure II.15, page 42) à partir de l'eau extraite de l'échantillon.

■ Figure II.14 - Schéma des méthodes de mesure du tritium.



Bruit de fond

Le bruit de fond du tritium, qui varie maintenant de 1 à 3 Bq/L dans l'eau de pluie, a considérablement décliné depuis les années 1960, après l'arrêt des essais atmosphériques d'armes nucléaires (*figure II.16*).

Hors de l'influence d'une installation rejetant du tritium, la concentration volumique (Bq/L) des diverses composantes du milieu (eau de pluie, vapeur d'eau atmosphérique, TOL et HTO des organismes vivants) est quasiment à l'équilibre et fluctue entre 1 et 3 Bq/L d'eau. Cela correspond à une activité de l'air de l'ordre de 0,01 Bq/m³ (tritium sous forme de vapeur d'eau) et une activité massive des végétaux et animaux de 1 à 3 Bq/kg frais. Le bruit de fond des eaux douces est de l'ordre de 1 à 3 Bq/L et dix fois moindre, de 0,1 à 0,2 Bq/L, dans l'eau de mer.

Installations rejetant du tritium

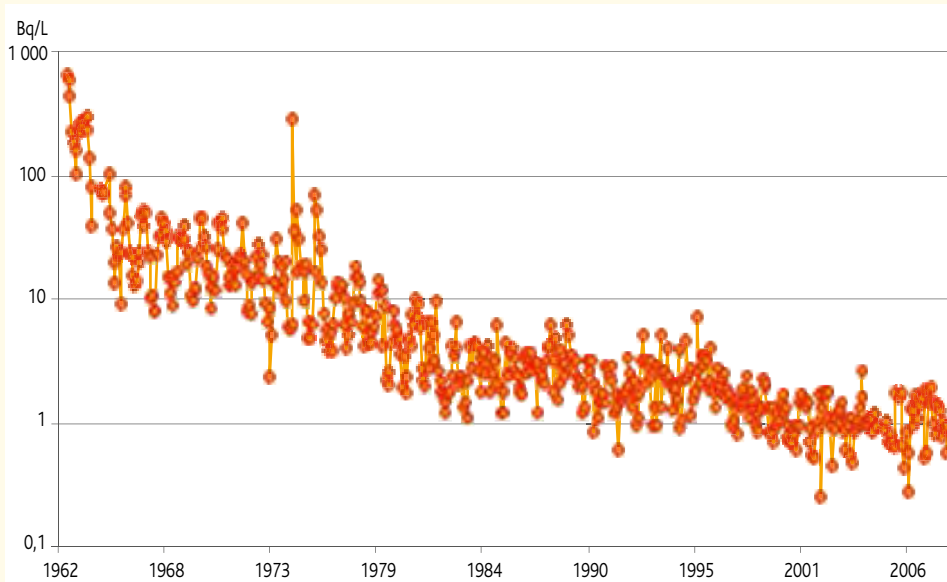
Les principales installations participant aux rejets de tritium par voie liquide (*figure II.17*) sont l'usine Areva de La Hague (11 600 TBq en 2012) en Manche (à ses rejets s'ajoutent ceux dix fois moindres de Sellafield en Angleterre) et les CNPE d'EDF rejetant de 22 à 123 TBq/an. Par voie atmosphérique, les centres CEA de Valduc (282 TBq en 2012) et Marcoule (210 TBq en 2012) sont les contributeurs majeurs suivis par l'usine Areva de La Hague (55 TBq en 2012) puis les centres de recherche du CEA Saclay (14 TBq en 2012), l'ILL (12 TBq en 2012) et enfin les CNPE EDF (1 à 7 TBq/an par CNPE, pour un total de 34 TBq en 2012 pour l'ensemble des sites EDF).

L'impact des rejets gazeux de ces installations, en termes d'augmentation des niveaux d'activité dans les échantillons environnementaux, est plus ou moins détectable localement.

© A. Delattre



■ *Figure II.15 - Compteurs à scintillation liquide.*



■ *Figure II.16 - Évolution de l'activité volumique en tritium des eaux de pluie de 1963 à 2008, à Thonon-les-Bains (Centre de recherche géodynamique, université P. et M. Curie).*

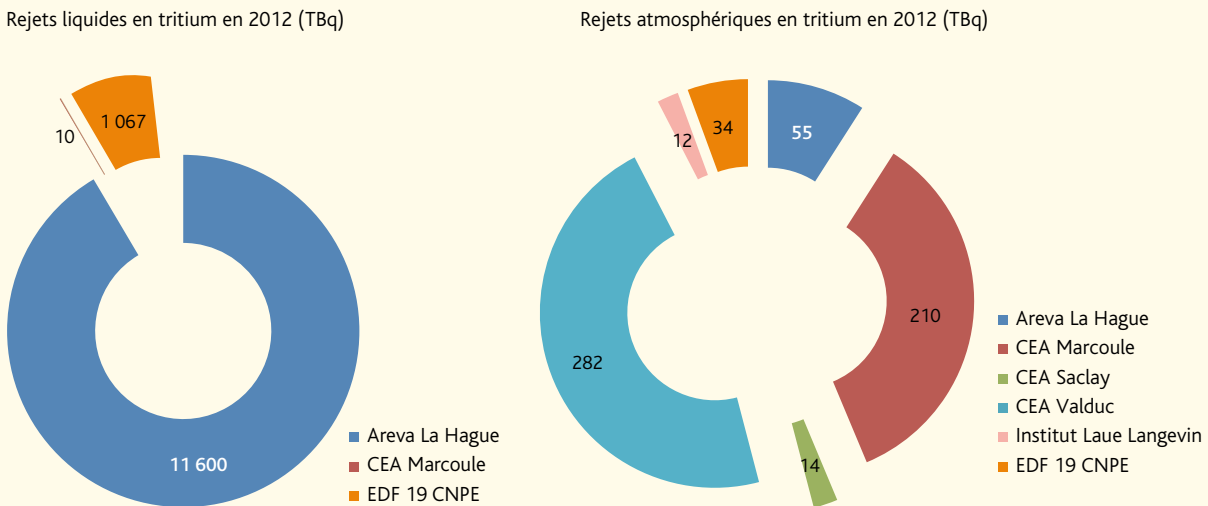
Le tritium dans le compartiment atmosphérique

À proximité des CNPE, les niveaux d'activités mesurés dans les eaux de pluie sont faibles mais discriminables du bruit de fond (figure II.18). Les niveaux d'activité moyens sont équivalents quelle que soit la localité : $3,4 \pm 2,5$ Bq/L pour les CNPE du bassin de la Loire, $4,2 \pm 2,6$ Bq/L pour les CNPE de l'est de la France, $3,5 \pm 2,4$ Bq/L pour les CNPE de la vallée du Rhône, $4,1 \pm 2,4$ Bq/L pour les CNPE du sud-ouest de la France et $3,71 \pm 1,88$ Bq/L pour les installations nucléaires de Manche et mer du Nord. Ces activités sont à relier aux rejets gazeux effectués par ces installations compris entre 1 et 7 TBq/an et

par site. Les installations de l'ILL, Saclay et La Hague, rejetant un peu plus de tritium par voie atmosphérique, conduisent à un marquage du même ordre de grandeur compris entre 1,6 et 8,4 Bq/L en moyenne.

Des niveaux plus élevés sont régulièrement mesurés dans les eaux de pluie prélevées aux alentours des centres d'études de Marcoule et de Valduc, en cohérence avec les niveaux de rejets de ces sites, respectivement 210 et 282 TBq pour l'année 2012. À proximité immédiate du site de Marcoule, l'activité moyenne du tritium dans l'eau de pluie sur 2011-2012 est de $15,6 \pm 2,8$ Bq/L, avec une activité maximale mesurée à 47 Bq/L entre novembre et décembre 2011, et une activité minimale de 2,8 Bq/L.

■ Figure II.17 - Rejets en tritium des différentes installations (données exploitants, en TBq pour 2012).



■ Figure II.18 - Activités moyennes en tritium mesurées dans les eaux de pluie en 2011-2012 (Bq/L).

Pour le site de Valduc, l'activité moyenne sur la même période est de $20,6 \pm 3,0$ Bq/L avec une activité maximale mesurée à 59 Bq/L, et une activité minimale de 6,6 Bq/L. Ces valeurs sont cohérentes avec l'activité moyenne du tritium mesuré dans l'air prélevé par barboteur (*figure II.19*) implanté sous influence des vents dominants du site de Valduc : $0,62 \pm 0,16$ Bq/m³ d'air (soit l'équivalent de 20 Bq/L de vapeur d'eau dans l'air) (*figure II.20*).

Le tritium dans le compartiment aquatique continental

Dans les fleuves « nucléarisés » (Rhône, Loire), l'activité du tritium est très variable suivant les types d'installations riveraines et les caractères hydrologiques des fleuves : les concentrations moyennes de l'eau et du tritium TOL des bioindicateurs vont de quelques Bq/L à quelques dizaines de Bq/L (*figure II.21*).

Figure II.19 - Photo d'un préleveur par barbotage permettant de quantifier le tritium dans l'atmosphère.



© Arnaud Bouissou/METL-MEDDE/IRSN

Bassin versant de la Loire

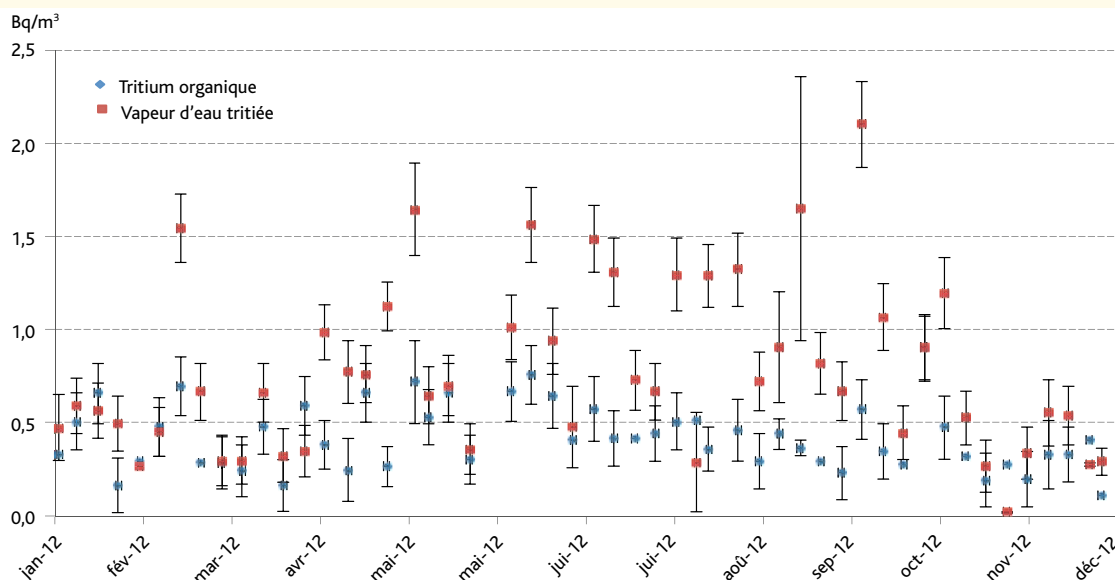
Le tritium des effluents liquides (250 TBq en 2012) des cinq CNPE dans la Loire (Belleville-sur-Loire, Dampierre-en-Burly, Saint-Laurent-des-Eaux et Chinon) et la Vienne (Civaux) est détectable en quasi-permanence dans l'eau de surface. Le CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux coordonne les rejets de l'ensemble des CNPE installés le long de ce fleuve. Sauf dérogation, deux rejets de réservoir ne peuvent être réalisés simultanément, ce que confirme l'absence de cumul net observé entre les mesures réalisées depuis Belleville jusqu'à Chinon. Ainsi, la Loire présente une activité moyenne du tritium de $20,6 \pm 3,3$ Bq/L en aval des CNPE qui y sont implantés. L'activité du tritium dans la Vienne en aval du CNPE de Civaux est de $17,6 \pm 3,3$ Bq/L.

Sur le bassin versant de la Loire (en incluant la Vienne), les matrices biologiques prélevées en aval des CNPE présentent des niveaux d'activités en tritium organiquement lié (TOL), qui varient notamment en fonction de la proximité du lieu de prélèvement par rapport à l'aval d'un CNPE. Ainsi, des carpes prélevées à 32 kilomètres en aval des rejets de la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux présentent une activité proche du bruit de fond ($0,0830 \pm 0,0058$ Bq/kg frais) alors que des barbeaux prélevés à moins de 1,5 kilomètres en aval de la centrale de Civaux présentent une activité reflétant l'influence des rejets ($1,240 \pm 0,064$ Bq/kg frais).

Bassin versant Rhin-Meuse

Le nord-est de la France comprend trois centres nucléaires de production d'électricité implantés sur les rives de la Meuse (CNPE de Chooz), de la Moselle (CNPE de Cattenom) et du grand canal d'Alsace (CNPE de Fessenheim). L'activité moyenne dans la Meuse en aval du CNPE de Chooz en 2012 a été mesurée à $15,6 \pm 3,5$ Bq/L avec un minima de 4,7 Bq/L et un maxima de 47,6 Bq/L. L'activité du tritium

Figure II.20 - Activité du tritium mesuré dans l'air ambiant prélevé par barboteur sous influence du site CEA de Valduc (Bq/m³).



mesurée dans le Grand Canal d'Alsace en aval du CNPE de Fessenheim n'est pas significativement différente de celle mesurée en amont. L'activité de ce radionucléide est à mettre en relation avec les rejets liquides chroniques de l'installation (31,3 TBq en 2012), et avec l'industrie horlogère suisse qui a rejeté du tritium retrouvé aujourd'hui sous forme organique fixée aux sédiments ; la dégradation lente et rémanente des matières organiques induisant une mobilité du tritium de la phase solide vers la phase aqueuse.

Les concentrations en tritium mesurées en aval du CNPE de Cattenom sur la Moselle, affluent du Rhin, ont une valeur moyenne de $15,6 \pm 3,5$ Bq/L, avec un minima de 19,8 Bq/L et un maxima de 42 Bq/L, et sont à mettre en relation avec les rejets liquides chroniques de l'installation (123 TBq en 2012).

Bassin versant du Rhône

Fortement nucléarisé, le Rhône est marqué par le tritium des rejets liquides (210 TBq en 2012) des installations qui bordent son cours (CNPE de Bugey, Cruas-Meysses, Saint-Alban, Tricastin et centres CEA de Marcoule et Pierrelatte). L'activité moyenne du tritium dans l'eau du Rhône en aval de ces installations nucléaires est de l'ordre de $8,6 \pm 2,1$ Bq/L au niveau de Cruas-Meysses et $13,3 \pm 2,4$ Bq/L plus en aval. Dans l'Isère, l'activité moyenne du tritium est de $3,6 \pm 2,1$ Bq/L. L'eau de la Durance en aval du site CEA de Cadarache ne présente pas d'activité détectable de tritium.

Bassin versant de la Garonne

Le tritium mesuré dans la Garonne en aval du CNPE de Golfech (48,8 TBq en 2012) est de l'ordre de $9,0 \pm 2,6$ Bq/L. Au niveau du CNPE du Blayais (39,5 TBq en 2012 sous forme liquide), situé à l'embouchure du fleuve, le tritium est mesuré

en aval immédiat des déversoirs de l'installation nucléaire et présente une activité moyenne de $19,5 \pm 3,1$ Bq/L.

Bassin versant de la Seine

Le CNPE de Nogent est la seule installation de production d'électricité qui rejette ses effluents directement dans la Seine (37,9 TBq en 2012) expliquant le tritium mesuré directement à son aval de l'ordre de $32,7 \pm 3,8$ Bq/L. D'autres installations nucléaires rejettent leurs effluents liquides dans le bassin versant de la Seine, comme le CEA de Saclay ($11,5 \pm 2,6$ Bq/L) ou le CEA de Bruyères-le-Châtel ($11,7 \pm 2,8$ Bq/L) en Île-de-France.

Plus en amont du bassin versant, le CEA de Valduc, principal émetteur de tritium dans l'atmosphère, marque les eaux de surface par ses rejets atmosphériques en champs proche à hauteur de $49,9 \pm 5,2$ Bq/L. En champ éloigné de ces installations, à hauteur de Croissy-sur-Seine, l'activité du tritium est de $8,5 \pm 2,5$ Bq/L dans l'eau de la Seine.

Pointe du Cotentin

La configuration générale du relief du Cotentin et l'étroitesse de la presqu'île ne laissent place qu'à de petites rivières côtières qui se jettent dans la Manche. Le tritium, rémanent à proximité du site de La Hague et du centre de stockage de la Manche, est détecté dans l'eau de tous les ruisseaux situés dans l'environnement immédiat du site (Grand Bel, Sainte-Hélène, Landes et Moulinets) avec des maxima enregistrés dans le ruisseau du Grand Bel de l'ordre de 529 ± 37 Bq/L. Ce tritium provient des rejets atmosphériques, les rejets liquides ayant lieu exclusivement par la canalisation de rejets en mer.



■ **Figure II.21** - Activités moyennes en tritium mesurées dans les eaux de surface en 2011-2012 (Bq/L).

Le tritium dans le compartiment continental

Pour la totalité des CNPE et la majorité des installations surveillées (hors Marcoule et Valduc), les niveaux d'activité en tritium mesurés dans les végétaux, les légumes et le lait sont proches du bruit de fond. Dans l'herbe, l'activité moyenne mesurée en 2012 à proximité de CNPE (Tricastin) présente des niveaux moyens en tritium libre de $4,92 \pm 1,98$ Bq/L.

Dans les légumes destinés à la consommation, l'activité du tritium libre est de l'ordre $3,42 \pm 2,17$ Bq/L à proximité des CNPE.

Concernant le lait (*figures II.22 et II.23*), les activités moyennes mesurées en 2011/2012 oscillent entre $2,77 \pm 2,2$ Bq/L pour les laits prélevés à proximité des CNPE de la Loire et $4,8 \pm 2,3$ Bq/L pour les laits prélevés à proximité des CNPE de la vallée du Rhône.

À proximité des sites rejetant le plus de tritium à l'atmosphère (le site CEA de Marcoule et le centre de Valduc), les niveaux mesurés sur les mêmes types de prélèvements indiquent un marquage de l'environnement par les rejets des sites dont l'intensité dépend notamment de la distance du prélèvement au site. Ainsi, à proximité du centre de Marcoule, l'herbe présente une activité moyenne en tritium de $117,8 \pm 5,3$ Bq/kg sec. Le lait prélevé dans des fermes situées à dix kilomètres du site présente une activité de $5,7 \pm 2,4$ Bq/L. À proximité du centre CEA de Valduc, le marquage est également mis en évidence par l'activité mesurée dans l'herbe ($20 \pm 1,1$ Bq/kg sec) et dans le lait prélevé à environ six kilomètres ($15,3 \pm 2,8$ Bq/L).

Le tritium dans le compartiment aquatique marin

Manche et mer du Nord

En Manche-mer du Nord, l'influence des rejets des CNPE (Flamanville, Paluel, Penly et Gravelines soit 281 TBq en 2012) est masquée par celle des rejets de La Hague (11 600 TBq en 2012) et de Sellafield.

Eau de mer

À proximité de l'émissaire de l'usine de La Hague, la concentration moyenne mesurée dans l'eau de mer est d'environ 10 Bq/L ($8,8 \pm 3,6$ Bq/L en moyenne mesurée à la pointe de Jardeheu) (*figure II.24*) avec une forte variabilité (de 5 à 50 Bq/L en quelques heures – voir *focus*), soit près de 100 fois supérieure au bruit de fond mesuré à des stations considérées comme situées hors influence des rejets, comme à Roscoff où l'on mesure $0,135 \pm 0,011$ Bq/L en tritium dans l'eau de mer.

Matrices biologiques

Ce gradient est également observé à travers les analyses de tritium organiquement lié (TOL) dans les algues. Les activités mesurées varient de $2,33 \pm 0,37$ Bq/kg sec dans les algues prélevées en Manche au nord du Cotentin pour diminuer à des valeurs proches de 1 Bq/kg sec en remontant vers la mer du Nord.

Des poissons pêchés en Manche, au large du Tréport, ont révélé une activité en tritium organiquement lié (TOL) de $0,55 \pm 0,11$ Bq/kg frais. En mer du Nord, l'activité en TOL mesurée dans des poissons pêchés à Dunkerque est de $0,48 \pm 0,21$ Bq/kg frais.



© Arnaud Bouissou/METL-MEDDE/IRSN

■ **Figure II.22**
Prélèvement de lait destiné à l'analyse radiologique.



Figure II.23 - Activités moyennes en tritium mesurées dans le lait en 2011-2012 (Bq/L).



Figure II.24 - Activités moyennes en tritium mesurées dans l'eau de mer et les algues en 2011-2012 (Bq/L).

Focus

Synthèse de l'analyse IRSN sur la concentration de tritium mesurée par l'Acro dans un prélèvement d'eau de mer effectué dans la baie d'Ecalgrain le 17 octobre 2012

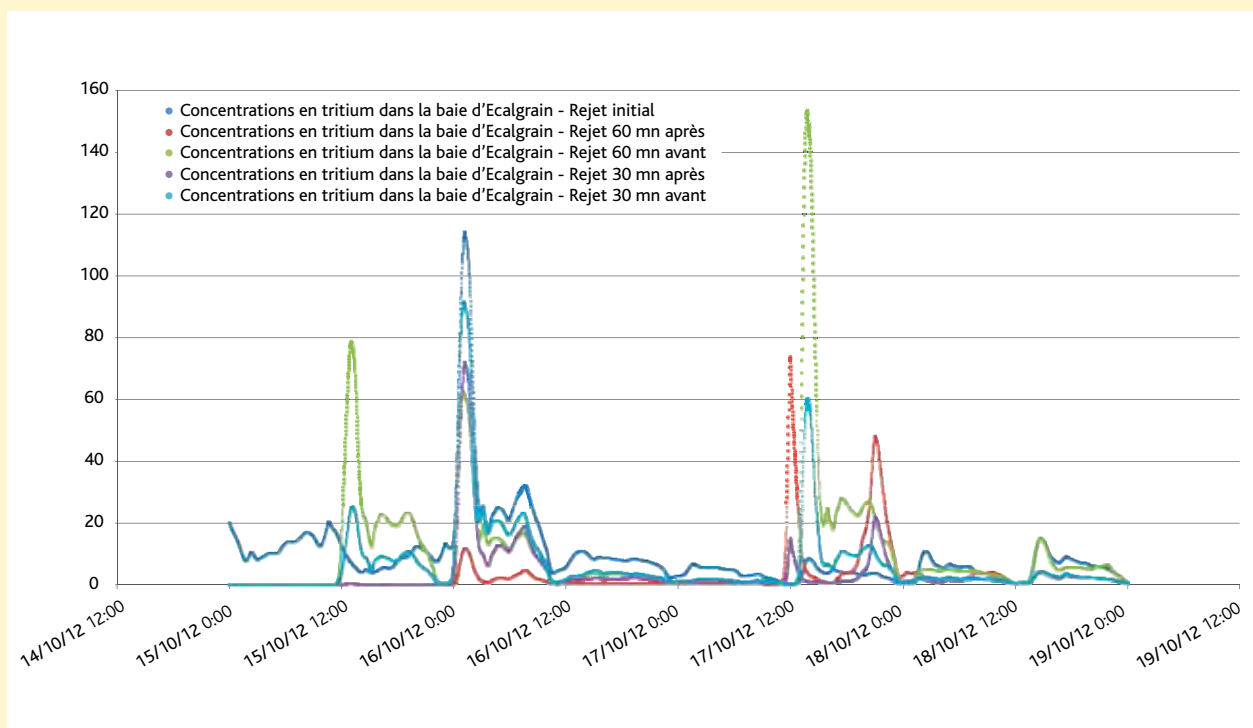
Dans le cadre de son autorisation de rejets, l'usine Areva de La Hague procède régulièrement à des rejets d'effluents liquides radioactifs dans la Manche au large de l'anse des Moulinets. L'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'ouest (Acro) a indiqué, dans un communiqué en date du 27 mars 2013, qu'elle avait relevé une valeur anormale (110 Bq/L) de tritium dans de l'eau de mer prélevée le 17 octobre 2012 dans la baie d'Ecalgrain, environ 3,5 kilomètres au nord du point de rejet de l'usine de La Hague.

Dans le cadre de sa mission de surveillance, l'IRSN mesure régulièrement le tritium dans l'eau de mer le long du littoral français entre Roscoff et Gravelines. Les concentrations de tritium à la station de Goury sont généralement comprises entre 5 et 20 Bq/L. Elles peuvent cependant, de façon sporadique, atteindre des valeurs de quelques dizaines de Bq/L.

Entre 2002 et 2005, près de 15 000 prélèvements ont ainsi été effectués lors de sept campagnes successives de prélèvement. Ces études ont permis de montrer que la dispersion des rejets de

l'usine de La Hague est étroitement dépendante de l'heure du rejet par rapport à la marée, du coefficient de marée et des conditions météorologiques, notamment liées au vent. Ceci conduit, pour des points de prélèvements situés à quelques kilomètres de l'émissaire, à observer d'importantes et rapides fluctuations de la concentration de tritium selon ces paramètres. Ces campagnes ont aussi permis de développer et de valider un code de calcul permettant de prévoir la dispersion des rejets de l'usine de La Hague en prenant en compte les conditions hydrodynamiques réelles (marées, courants) ainsi que les conditions météorologiques. À la suite du communiqué de l'Acro, ce code a été utilisé pour simuler la dispersion des rejets réels de l'usine de La Hague pour la période du 3 au 19 octobre 2012 et pour calculer les concentrations attendues de tritium aux points de prélèvement d'Ecalgrain (Acro) et de Goury (IRSN). Les modélisations reproduisent, pour les deux sites étudiés, des variations rapides de la concentration en tritium similaires à celles qui ont été observées à Goury en 2009. Du fait de la complexité des phénomènes de dispersion, il n'existe pas de corrélation temporelle entre l'émission d'un rejet et l'apparition d'un pic de concentration sur l'un ou l'autre des sites étudiés. Les valeurs maximales des pics de concentration sont plus élevées (de l'ordre de 30 à 40 %) à Ecalgrain qu'à Goury et leur apparition est quasi synchrone sur les deux sites. Pour ce qui concerne le site d'Ecalgrain, la simulation ne permet pas de retrouver l'observation faite par l'Acro le 17 octobre 2012 puisque la concentration simulée est de l'ordre de 10 Bq/L alors que l'observation est de 110 Bq/L. Cependant, l'un des paramètres clés pour la modélisation de la dispersion des rejets en mer dans ce secteur est l'heure du rejet par rapport à la

Figure II.25 - Étude de sensibilité à l'heure des rejets de l'usine de La Hague, des valeurs de concentration de tritium modélisées à Ecalgrain.



marée dont vont dépendre les courants locaux. L'IRSN a effectué une analyse de sensibilité à cette heure de rejet en considérant des variations d'une heure autour de l'heure de rejet indiquée par Areva. Il apparaît que si l'horaire de rejet est décalé d'une heure plus tôt, des valeurs de concentration de l'ordre de grandeur de celles qui ont été observées par l'Acro (110 Bq/L) à Ecalgrain le 17 octobre 2012 sont prédites par le modèle (150 Bq/L au maximum) entre 15 h et 17 h (figure II.25). L'ensemble de ces résultats indique donc que la valeur de 110 Bq/L observée par l'Acro en octobre 2012 correspond très probablement à un prélèvement effectué durant l'un de ces pics de concentration.

En plus des mesures de tritium dans l'eau, l'IRSN mesure aussi régulièrement la concentration du tritium dans diverses espèces marines (algues, mollusques, crustacés, poissons). Ainsi, des mesures de tritium ont été régulièrement effectuées, conjointement avec des mesures dans l'eau de mer, dans des algues et des mollusques (patelles) entre mai 2009 et novembre 2011 à la station de Goury. Dans le cadre de ces études, l'IRSN a constaté que la concentration de tritium de l'eau libre de l'organisme s'équilibre très rapidement avec la concentration de tritium dans l'eau de mer. Les conséquences de ces variations de concentration de tritium dans l'eau de mer, et donc dans les espèces marines, sur les doses reçues par l'homme peuvent être évaluées en se rapportant aux travaux effectués dans le cadre du Groupe radioécologie Nord-Cotentin (GRNC) en 1996. En considérant, de manière très conservatrice, que les concentrations de l'eau de mer sont, durant toute une année, au niveau du pic de concentration observé à Ecalgrain (110 Bq/L), cela ne conduirait pas à modifier de manière significative la dose efficace totale pour l'année 1996 (augmentation d'environ 1 % de la dose efficace totale soit 0,3 pSv). Les pics de concentration de tritium observés sporadiquement dans l'eau de mer ont donc une influence négligeable sur les évaluations de l'impact dosimétrique à la population effectuées ces dernières années dans le Nord-Cotentin, en particulier par le GRNC.

L'ensemble des travaux expérimentaux in situ et de modélisation menés ces dernières années par l'IRSN sur la dispersion des effluents liquides de l'usine de La Hague montre que, à l'échelle de un à deux jours, celle-ci est très largement gouvernée par les courants de marée et, dans une moindre mesure, par les conditions météorologiques. Dans ces conditions, pour un point donné situé à quelques kilomètres de l'émissaire, des variations très importantes et rapides de la concentration de tritium peuvent être observées selon l'heure à laquelle sera effectué le prélèvement. La valeur de 110 Bq/L observée par l'Acro en octobre 2012 correspond donc très probablement, comme le démontrent les simulations effectuées par l'IRSN, à un prélèvement effectué durant un de ces pics de concentration. Les études menées par l'IRSN montrent par ailleurs que la concentration de tritium dans les organismes marins (exprimée en Bq/kg) est similaire à celle mesurée dans l'eau de mer (Bq/L). Le réexamen, à la lumière de ces éléments, des évaluations dosimétriques détaillées effectuées par le GRNC permet de conclure que ces pics de concentration de tritium ont une influence négligeable sur celles-ci.

Atlantique

Eau de mer

Sur la façade atlantique, le tritium est mesuré à des concentrations nettement plus faibles qu'en mer du Nord, sauf au niveau de l'embouchure des fleuves sur lesquels sont implantés les CNPE de la Loire et de la Garonne où son activité est de l'ordre de 5 Bq/L. Hors influence des installations nucléaires, le niveau du tritium mesurable est de $0,121 \pm 0,011$ Bq/L à Arcachon et de $0,235 \pm 0,011$ Bq/L à Concarneau à la Pointe de Trévignon.

Matrices biologiques

Le tritium mesuré dans les poissons pêchés dans l'Atlantique (Oléron, Saint-Christoly-Médoc, Roscoff et Concarneau) présente en moyenne une activité de $0,469 \pm 0,058$ Bq/kg frais. Les huîtres prélevées à Arcachon présentent une activité en tritium de $0,0813 \pm 0,0054$ Bq/kg frais.

Méditerranée

Eau de mer

Une activité en tritium de l'ordre de 5 Bq/L, supérieure aux valeurs habituellement mesurées, est détectée ponctuellement dans la rade de Toulon. Le tritium n'est pas détecté ailleurs en Méditerranée.

Matrices biologiques

Les poissons pêchés à proximité du port militaire de Toulon présentent des activités moyennes en tritium de $1,45 \pm 0,20$ Bq/kg frais.

Dans le cadre de la campagne Rinbio, l'IRSN a réalisé en 2009 des mesures en tritium lié à la matière organique sur l'ensemble des échantillons de moules prélevés en différentes stations du pourtour méditerranéen français, mettant en évidence un marquage local en tritium : à la station de Sainte-Marie-de-la-Mer, située sous l'influence du Rhône et à la station « Ifremer » dans la Petite Rade de Toulon. C'est par ailleurs sur ces échantillons de la Rade de Toulon que sont mesurées les activités les plus élevées (jusqu'à $51,9 \pm 1,5$ Bq/kg sec, alors que le niveau « bruit de fond » est inférieur à 1 Bq/kg sec dans les moules).

En 2012, huit prélèvements de moules ont été réalisés dans la Petite et la Grande Rade de Toulon.

Les résultats montrent, qu'à cette période, seule la Petite Rade présente une activité en tritium lié supérieure aux activités habituellement rencontrées dans les moules prélevées hors de toute influence (inférieures à 1 Bq/kg sec). En effet, les valeurs mesurées dans les moules prélevées dans la petite rade s'élèvent de $2,1 \pm 0,5$ à $5,5 \pm 0,6$ Bq/kg sec de tritium lié.

En résumé

À l'échelle du territoire national, sa concentration varie essentiellement en fonction de la proximité des rejets. Ainsi, les environnements atmosphériques de Marcoule et Valduc sont-ils marqués par les rejets des centres situés à proximité alors que c'est dans l'environnement marin de La Hague que les concentrations en tritium sont les plus élevées.

Focus

Surveillance radiologique à Saint-Maur-des-Fossés (Val-de-Marne), suite à une pollution accidentelle par du tritium

En novembre 2010, l'IRSN est intervenu sur un cas rare de contamination environnementale au tritium sur un site situé en zone urbaine près de Paris. Cette contamination résultait de la présence, dans les locaux d'une entreprise, d'un dispositif expérimental comportant un tamis moléculaire provenant du site nucléaire de Valduc et qui était supposé, à tort, ne pas contenir de tritium.

Actions immédiates

L'IRSN est intervenu rapidement pour réaliser une caractérisation initiale de la contamination en tritium dans les locaux de l'entreprise et dans son environnement proche. Les premiers résultats montraient l'existence d'une forte contamination des locaux (activité en tritium > 150 000 Bq/m³ dans l'air) et un net marquage des échantillons prélevés dans l'environnement proche de l'entreprise (entre 1 000 et 10 000 Bq/kg frais dans les végétaux, entre 500 et 1 500 Bq/L dans les eaux).

Ils ont conduit l'IRSN à mener de multiples investigations :

- mesures de tritium sur des échantillons d'eau, d'air et de végétaux prélevés dans l'environnement près du bâtiment afin

de connaître l'importance et l'étendue du marquage de l'environnement et de suivre son évolution au cours du temps : 450 mesures ont été réalisées entre novembre 2010 et avril 2013 ;

- mesures de tritium dans les urines de riverains proches du bâtiment contaminé, évaluations dosimétriques de l'exposition au tritium des salariés et visiteurs de l'entreprise contaminée.

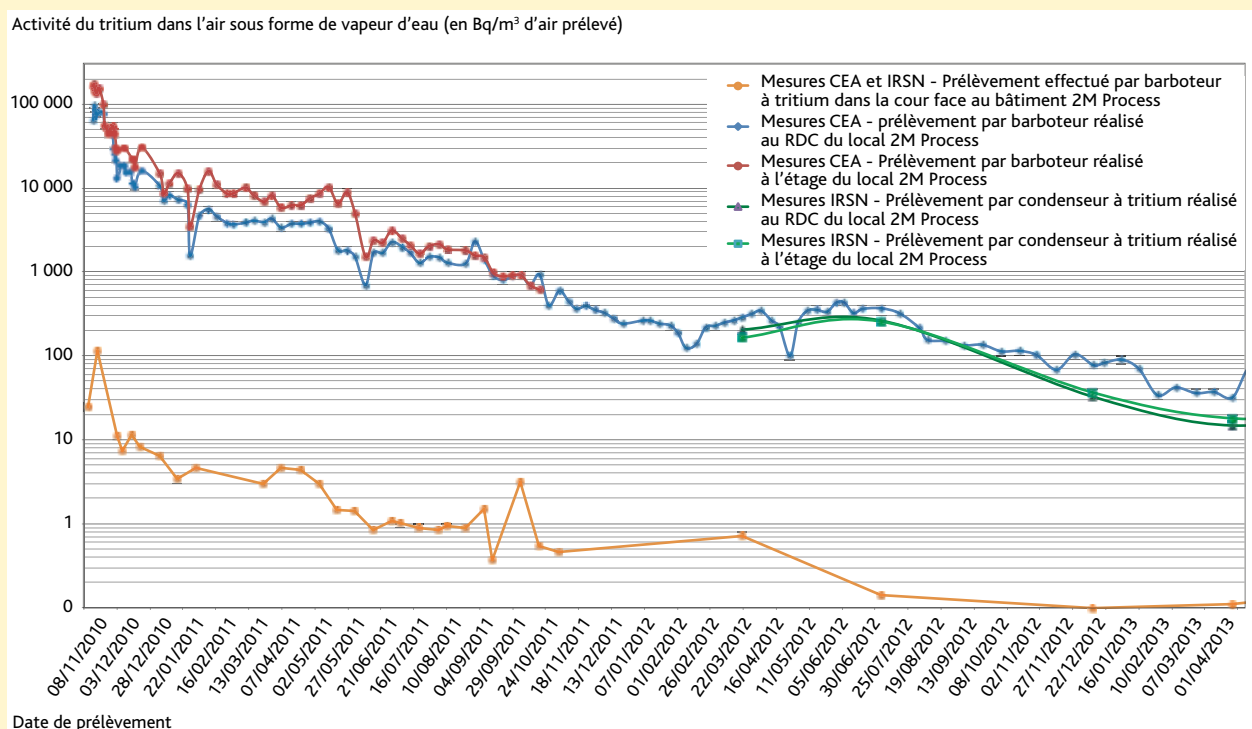
Principaux résultats pour l'année 2012

Les résultats relatifs à la période novembre 2010 – février 2012 ont été publiés dans le Bilan radiologique de l'environnement français en 2010-2011 (chapitre III.3). Les données présentées dans ce focus intègrent les résultats de la campagne de prélèvements du 28 mars 2013.

Le tritium dans l'air et dans l'eau de pluie

Les derniers résultats de mesures réalisées par le CEA et l'IRSN dans la cour, à proximité immédiate des locaux contaminés, pour les campagnes de prélèvements de février 2012 à mars 2013, se situent autour de 0,1 Bq/m³ et confirment la poursuite de la diminution progressive des niveaux de tritium dans l'air mesurés dans la cour, observée depuis le mois de décembre 2010 (figure II.26). Depuis le mois de juin 2012, les activités en tritium dans l'air mesurées par le CEA avec le barboteur sont proches, voire inférieures, aux limites de détection (0,07 Bq/m³). Ces mesures sont cohérentes avec celles réalisées par l'IRSN avec une technique de prélèvement différente (condenseur à tritium). Pour rappel, les

Figure II.26 - Activité volumique du tritium sous forme de vapeur d'eau dans l'air prélevé dans le local contaminé et dans la cour, entre le 8 novembre 2010 et le 28 mars 2013.



niveaux habituellement observés dans l'air, à l'écart de toute source d'émission de tritium, sont de l'ordre de 0,01 à 0,05 Bq/m³.

La baisse observée dans la cour peut être corrélée à celle observée à l'intérieur du local contaminé, où le CEA, en charge de l'assainissement, maintient une surveillance de l'air intérieur, sous le contrôle de l'ASN. En complément, l'IRSN effectue depuis le mois de mars 2012 des prélèvements par condenseur à tritium au rez-de-chaussée et à l'étage du local (figure II.27).

Après une légère augmentation pendant la période estivale en 2012 (pic à 433 Bq/m³ en juin 2012), les résultats de mesures acquis depuis le second semestre 2012 jusqu'au 28 mars 2013 montrent une baisse constante et régulière des niveaux d'activité en tritium, à présent de l'ordre de 20 Bq/m³ (mesures réalisées sur des prélèvements ponctuels par l'IRSN) à 40 Bq/m³ (mesures réalisées sur des prélèvements continus par le CEA). Ces niveaux, même s'ils témoignent toujours de la présence de tritium dans l'air ambiant du local, liée à l'incident radiologique, ont donc baissé d'un facteur 10 entre juin 2012 et mars 2013.

Depuis novembre 2010, l'IRSN, puis le CEA, récoltent des échantillons d'eau de pluie à l'aide d'un collecteur installé dans la cour du bâtiment de 2M Process, pour en mesurer le tritium. Compte tenu de la méthode de prélèvement utilisée (cumul de pluie sur plusieurs jours), le tritium présent dans ces échantillons résulte aussi bien d'échanges entre les gouttes de pluie et l'air traversé au moment des précipitations, que d'échanges ultérieurs entre

l'eau accumulée par le collecteur et l'air ambiant dans la cour. La figure II.28 (page 52) présente les résultats obtenus par l'IRSN et le CEA à partir des prélèvements effectués.

Les niveaux de tritium dans les eaux de pluie prélevées depuis le mois de septembre 2011 sont majoritairement inférieurs à la limite de détection (de l'ordre de 5 Bq/L) indiquant que l'activité a atteint des niveaux difficilement détectables par les techniques d'analyse utilisées.

Ces résultats sont cohérents avec la diminution de l'activité en tritium de l'air (sous forme de vapeur d'eau) mesurée depuis 2011. Toutefois, compte tenu des variations observées sur l'ensemble de la série de résultats pour l'eau de pluie et de la complexité des phénomènes d'échange avec l'atmosphère, il n'est pas possible de tirer d'autres conclusions à partir de ces résultats.

Le tritium dans les végétaux

Les feuilles de végétaux constituent d'excellents indicateurs biologiques car les échanges avec le tritium présent dans l'air (molécules d'eau tritiée) sont rapides et permanents et permettent de suivre la dynamique d'évolution du tritium dans l'air au cours des jours qui précèdent le prélèvement. Depuis le 5 novembre 2010, l'IRSN a effectué régulièrement des prélèvements de végétaux (principalement des feuilles de lierre à l'extrémité des tiges, mais aussi de laurier...) en divers points de la zone surveillée, pour en mesurer le tritium total. Depuis le 16 mars 2011, l'IRSN partage cette surveillance avec le CEA.

■ **Figure II.27** - Prélèvements de vapeur d'eau de l'air dans le local contaminé avec un barboteur (équipement installé par le CEA) et un condenseur à tritium (équipement IRSN).



Tous les résultats obtenus, incluant ceux acquis lors des dernières campagnes de février 2012 à mars 2013, sont représentés sur les cartes disponibles sur le site Internet de l'IRSN, permettant de suivre l'évolution spatiale et temporelle du marquage par le tritium.

L'examen des résultats de mesures présentés sur la figure II.29 indique les tendances générales suivantes :

- les concentrations en tritium les plus élevées ont été observées dans les feuilles de végétaux prélevées à moins d'une dizaine de mètres du bâtiment, principalement dans la cour de 2M Process. Au fil du temps, une diminution lente mais constante, de l'activité en tritium dans les feuilles a été constatée. De plusieurs milliers de Bq/kg frais en novembre et décembre 2010 dans les végétaux situés à 2 mètres du bâtiment, l'activité en tritium est de l'ordre de 30 Bq/kg frais depuis le dernier trimestre 2011 et s'est stabilisée à ce niveau en mars 2013 ;
- au-delà de la cour, dans un rayon d'une cinquantaine de mètres autour du bâtiment de 2M Process, l'activité en tritium dans les feuilles est désormais proche ou inférieure aux limites de détection (de l'ordre de 20 Bq/kg frais).

Les notes d'information précédentes avaient montré qu'au-delà d'une cinquantaine de mètres, le niveau de tritium dans les végétaux se situe systématiquement en dessous des limites de détection des appareils de mesure, confirmant la rapide atténuation du marquage en tritium en s'éloignant du site de 2M Process,

déjà observée pour les eaux de surface. Pour cette raison, l'IRSN a également décidé au cours de l'année 2012 de maintenir sa surveillance uniquement dans le périmètre de la cour à proximité du local contaminé.

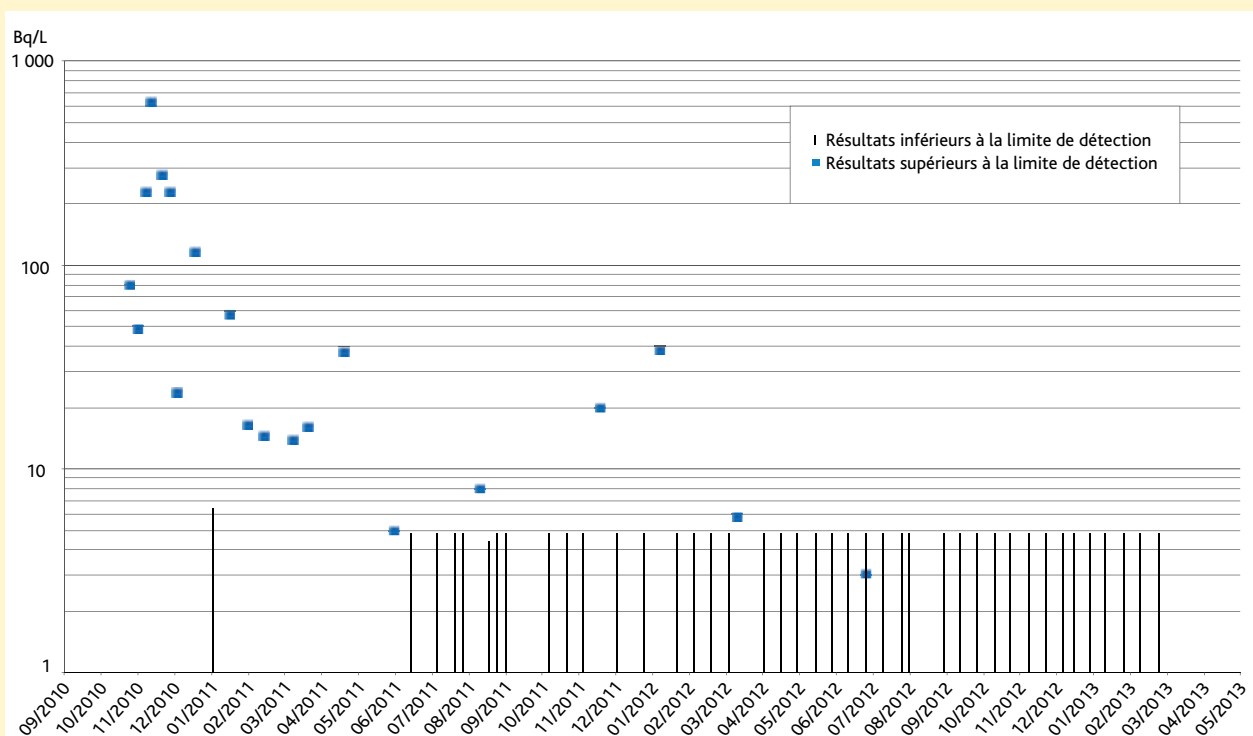
Conclusions

Avec plus de 370 résultats de mesure acquis au cours de 28 campagnes de prélèvement, l'IRSN dispose d'une connaissance précise de l'évolution spatiale et temporelle du tritium total dans les feuilles des végétaux au cours des derniers mois. Les résultats acquis au cours de l'année 2012 et du premier trimestre de l'année 2013 confirment la poursuite de la tendance générale à la baisse, notamment dans la cour attenante au bâtiment de 2M Process, tendance également observée à partir des résultats du plan de surveillance complémentaire réalisé par le CEA.

Ces résultats indiquent une influence des rejets passés de tritium émis par le bâtiment 2M Process, qui s'atténue rapidement en s'éloignant de ce site. Dans l'absolu, ce sont des valeurs négligeables en termes de risque radiologique pour les écosystèmes et pour la santé humaine.

L'IRSN rappelle que l'ensemble des résultats obtenus dans l'environnement, s'ils démontrent incontestablement la persistance d'un faible marquage environnemental provoqué par les rejets de tritium du bâtiment de 2M Process, ne sont pas de nature à remettre en cause l'évaluation des doses reçues par les

Figure II.28 - Activité volumique du tritium de l'eau de pluie prélevée dans la cour, à 10 mètres du local 2M Process, entre le 8 novembre 2010 et le 28 février 2013 (Bq/L).



riverains les plus proches du bâtiment. Compte tenu de la persistance d'un faible marquage observable dans l'environnement et du plan de surveillance de l'environnement mis en œuvre par le CEA, l'IRSN a poursuivi en 2013 une surveillance allégée, à un rythme trimestriel, dans l'environnement proche du local contaminé.

Information du public et des parties prenantes

Dès novembre 2010, l'IRSN a étroitement collaboré avec la mairie afin de faciliter les premières interventions en milieu urbain et notamment de faciliter, voire d'orienter les prises de contact pour accéder aux propriétés privées. Dans cette perspective, l'IRSN a participé à des réunions publiques organisées afin de présenter l'origine de cet accident et les résultats des mesures de tritium aux habitants du quartier. L'IRSN publie régulièrement sur son site Internet des notes d'information rendant compte des résultats de mesure du tritium obtenus à l'issue des campagnes de prélèvement.

En savoir plus : www.irsn.fr

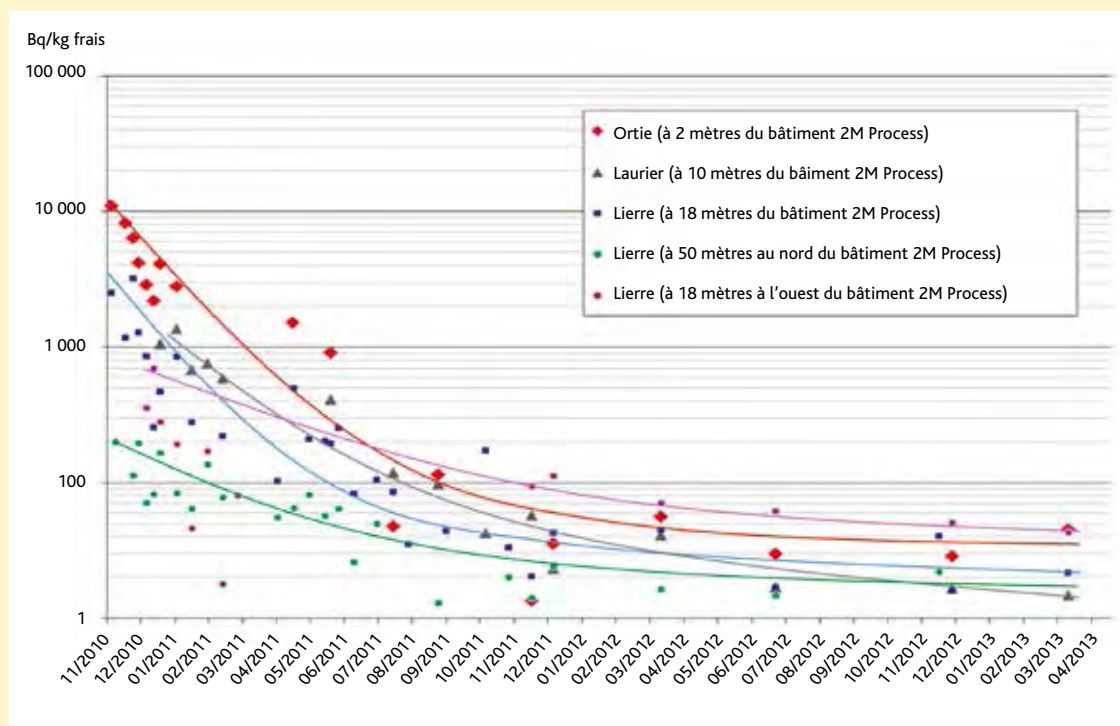
Retour d'expérience

Cet incident inhabituel, classé au niveau 2 sur l'échelle INES, a entraîné le gréement, pendant une semaine, du centre technique de crise de l'IRSN afin de traiter les saisines et de gérer les relations avec le CEA et les autorités compétentes.

Il a par ailleurs mobilisé de nombreuses équipes de l'Institut afin de gérer en parallèle le volet sanitaire et le volet environnemental. La capacité de mobilisation et d'intervention de l'IRSN a donc été testée in situ lors des premiers jours qui ont suivi la découverte de la contamination. Suite à cet événement, l'IRSN s'est doté d'équipements permettant de mesurer le tritium directement sur le terrain dans des camions laboratoires.

Si cette réactivité semblait nécessaire dès les premières heures, le retour d'expérience a montré qu'il était tout aussi important de rester disponible pour les autorités locales et le public, et de ne pas banaliser l'incident malgré son impact sanitaire négligeable.

Figure II.29 - Évolution au cours du temps de l'activité en tritium mesurée entre le 5 novembre 2010 et le 28 mars 2013 dans des feuilles d'ortie, de laurier et de lierre prélevées à proximité du local contaminé (Bq/kg frais).



II.4 LE CARBONE 14

Introduction

Origines

Isotope radioactif du carbone, le carbone 14 a une double origine : le carbone 14 naturel résulte de l'action des neutrons cosmiques sur les atomes d'azote dans la stratosphère et dans la partie supérieure de la troposphère. Le taux annuel de production est d'environ $1,40 \cdot 10^{15}$ Bq et la réserve atmosphérique de carbone 14 à l'équilibre est d'environ $140 \cdot 10^{15}$ Bq (Unsear, 2008).

Lors des explosions nucléaires, les neutrons émis interagissent comme les neutrons cosmiques avec l'azote de l'atmosphère pour former du carbone 14 (la production de carbone 14 lié aux explosions nucléaires est estimée à $3,5 \cdot 10^{17}$ Bq de carbone 14 environ). Dans les réacteurs nucléaires, la production de carbone 14 provient de réactions au niveau du combustible, des matériaux de structure du cœur et du modérateur.

Comportement et mesure du carbone 14

Le comportement dans la biosphère du carbone 14 et son « transfert » sont indissociables des processus généraux du cycle du carbone, notamment son incorporation dans la matière organique des végétaux par photosynthèse et dans celle des animaux par ingestion de carbone organique. À l'équilibre,

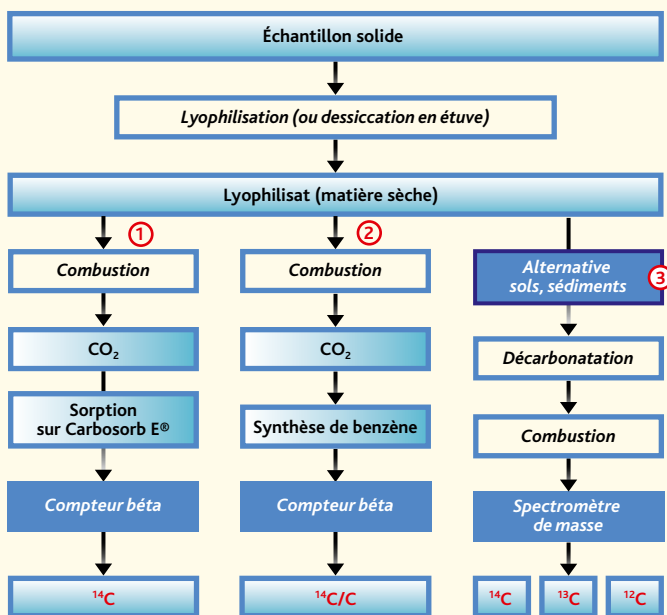
en négligeant d'une part le fractionnement isotopique $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, d'autre part les phénomènes transitoires et en lissant les effets des cycles journaliers, saisonniers et annuels, l'activité spécifique (Bq $^{14}\text{C}/\text{kg C}$ organique) est constante, à l'échelle annuelle, dans les composantes végétales et animales de l'environnement.

Plusieurs méthodes, plus ou moins sophistiquées, de mesure du carbone 14 peuvent être utilisées (figures II.30 et II.31), avec des limites de détection et des incertitudes variables. La technique de synthèse de benzène mise au point à l'IRSN fournit directement l'activité spécifique $^{14}\text{C}/\text{C}$ sur quasiment toute la gamme des teneurs en carbone 14 présentes dans l'environnement, avec des incertitudes de l'ordre de 8 % pour des matrices ayant des concentrations en carbone 14 au niveau du bruit de fond environnemental.

L'essentiel du carbone 14 actuellement mesuré dans l'environnement, hors de l'influence directe d'une installation, est d'origine naturelle (95 %) et, pour une part de plus en plus faible, imputable à la rémanence des tirs atmosphériques des années 1960 à 1980.

En milieu terrestre (figure II.32a), l'activité spécifique des végétaux et animaux est en équilibre avec celle du CO_2 atmosphérique. Le bruit de fond, hors de l'influence directe d'un rejet gazeux, qui diminue lentement, avec une période apparente de 125 ans, depuis l'arrêt des essais atmosphériques, est en 2011-2012 de l'ordre de 232 ± 4 Bq/kg C (tableau II.1), ce qui représente de l'ordre de 45 mBq/m³ d'air ou de 10 à 100 Bq/kg frais de denrées, selon leurs teneurs en carbone.

■ Figure II.30 - Résumé des principales méthodes de mesure du carbone 14 sur des échantillons solides.



- ① Oxydizer + scintillation liquide ; LD et incertitudes fortes (lait excepté)
- ② Synthèse de benzène + scintillation liquide ; LD et incertitudes faibles
- ③ AMS : technique très performante mais longue et coûteuse

■ Figure II.31 - Lyophilisation des échantillons préalablement aux protocoles de mesurage du carbone 14.



© IRSN

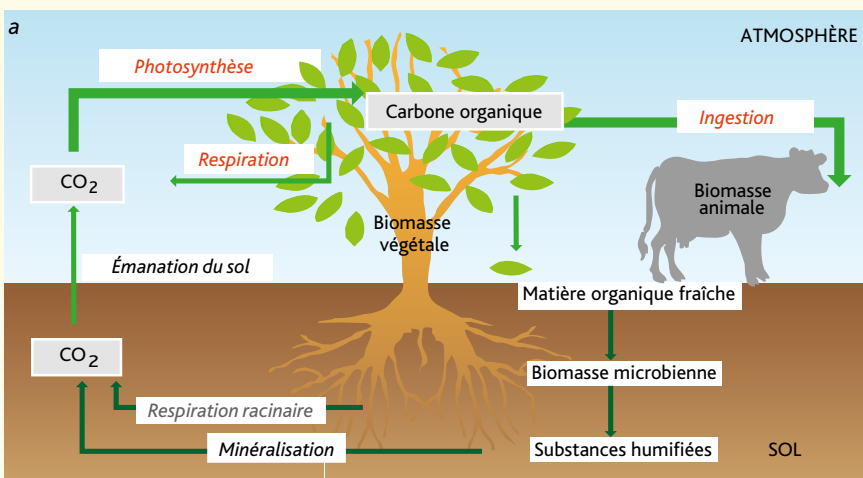
En **milieu aquatique**, le carbone se répartit entre carbone organique (dissous et particulaire) et carbone minéral (CO_2 et acide carbonique dissous, carbonates et bicarbonates) et subit un ensemble complexe de processus biochimiques (figure II.32b).

Le carbone 14 des écosystèmes d'eau douce n'est donc pas en équilibre avec le carbone 14 atmosphérique. Hors de l'influence directe d'une installation, les niveaux, fortement influencés par la teneur en carbonates du milieu, varient actuellement entre 200 et 220 Bq/kg C pour ce qui concerne l'eau (carbone minéral), les végétaux immergés et les poissons, ce qui représente de l'ordre de 0,02 Bq/L d'eau douce et de 10 à 50 Bq/kg frais pour les végétaux immergés et les poissons.

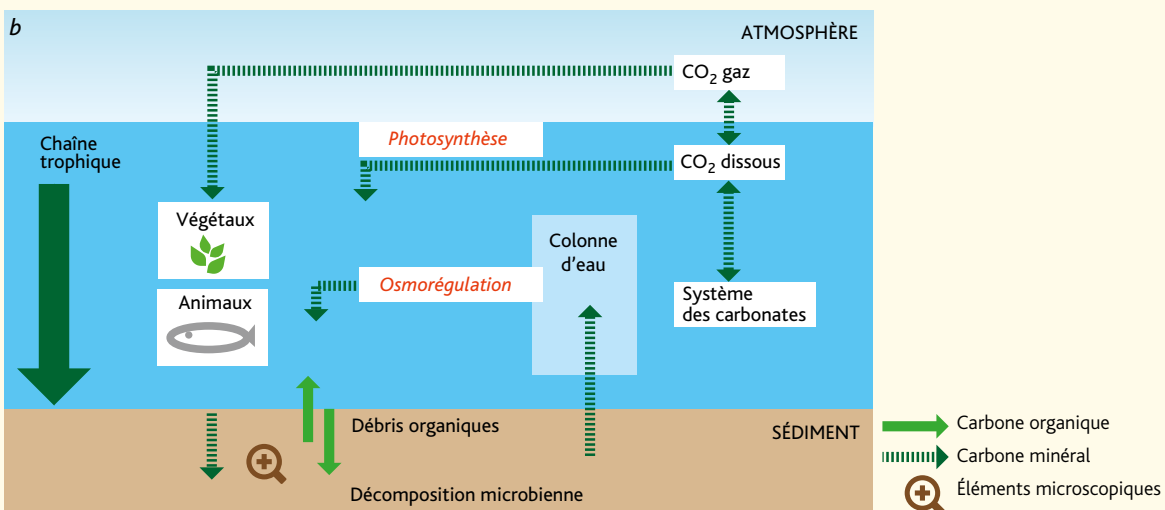
En milieu marin, les mécanismes de transfert du carbone 14 sont similaires à ceux du milieu dulçaquicole, bien que leurs cinétiques soient différentes : le carbone 14 est en majorité sous forme minérale dissoute ; il s'incorpore à la matière organique des végétaux par photosynthèse et est transféré aux animaux via la chaîne trophique. Hors de l'influence directe d'une installation, les niveaux du carbone 14 sont proches de ceux observés en milieu terrestre, de l'ordre de 240 Bq/kg C pour la décennie en cours. Près des points de rejets, l'équilibre entre les activités spécifiques de la matière organique et de l'eau de mer est rarement atteint en raison, notamment, d'une période de décroissance biologique (quelques semaines à quelques mois) du carbone dans les végétaux et animaux.

Département	Valeur
Alpes-de-Haute-Provence	229,5 ± 1,7
Bouches-du-Rhône	231,5 ± 1,4
Puy-de-Dôme	233,8 ± 1,6
Finistère	232,2 ± 1,6
Ille-et-Vilaine	232,2 ± 1,5
Morbihan	231,7 ± 1,7

■ **Tableau II.1** - Activité spécifique du carbone 14 dans des feuilles de chênes prélevées hors de l'influence d'un rejet atmosphérique en 2011 et 2012 (Bq/kg C).



■ **Figure II.32** - Voies de transfert du carbone et du carbone 14 en milieu terrestre (a) et en milieu dulçaquicole (b).



Principaux rejets de carbone 14

L'usine Areva de La Hague est l'établissement qui rejette le plus de carbone 14 par voie liquide (7 TBq/an) et atmosphérique (16 TBq/an), ce qui induit des activités spécifiques particulièrement élevées : on mesure régulièrement aux alentours du site des activités spécifiques dépassant de 2 à 20 fois en milieu marin et de 2 à 5 fois en milieu terrestre celles du bruit de fond. Les autres rejets notables, bien moindres, sont ceux du centre CEA de Saclay et ceux, variables suivant les paliers et le nombre de tranches par site, des REP d'EDF, avec des impacts plus ou moins visibles sur les résultats de mesure d'échantillons : quelques Bq/kg C ajoutés au bruit de fond en milieu terrestre et jusqu'à quatre à cinq fois le bruit de fond dans les organismes aquatiques.

Le carbone 14 en milieu atmosphérique

Le carbone 14 atmosphérique est rarement mesuré dans l'environnement (i.e., hors des exutoires des installations) car le prélèvement d'échantillons nécessite la mise en œuvre de barboteurs¹ dont la mise en place et l'exploitation ne sont pas simples et qui restent réservés à des études particulières ou bien aux mesures réglementaires des exploitants. C'est le cas à proximité de La Hague où, durant la période juin 2011 – décembre 2012, la concentration du carbone 14 dans l'air mesuré par Areva a varié de 0,03 à 0,14 Bq/m³ (source RNM).

1 - Système assurant le prélèvement d'air par aspiration et le piégeage du carbone de l'air sous forme CO₂, puis après combustion dans un four, sous ses éventuelles autres formes. Les pots récepteurs doivent être changés tous les 15 jours environ et le système doit être alimenté en électricité et placé à l'abri des perturbations.

■ **Figure II.33** - Stations de prélèvement d'échantillons destinés à la mesure du carbone 14 en milieu terrestre autour de l'usine de La Hague.

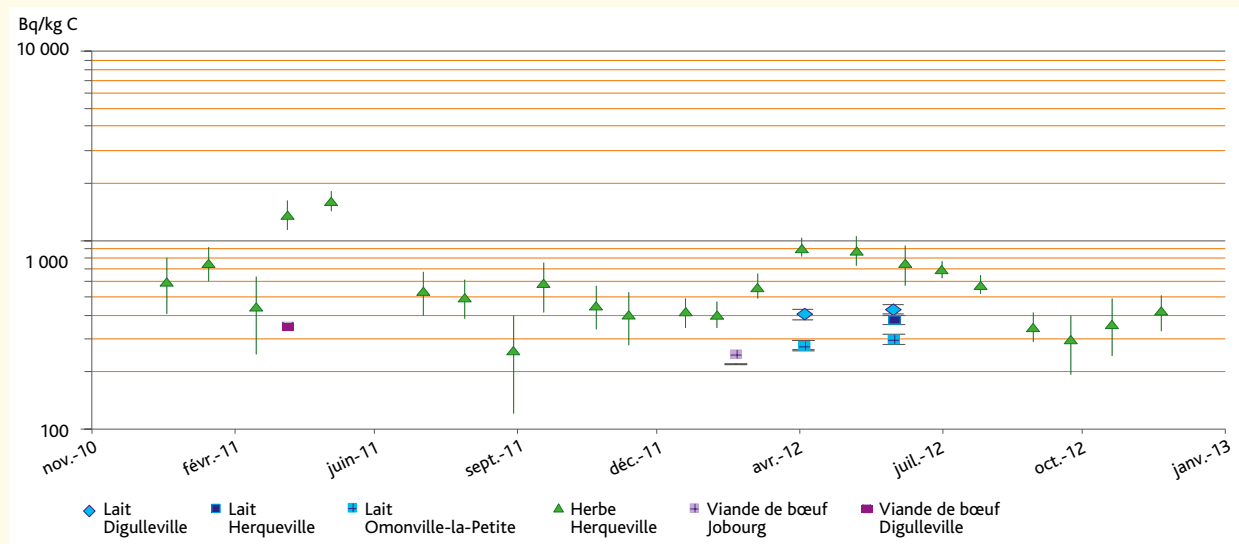
■ **Figure II.34** - Activités spécifiques du carbone 14 dans l'herbe, le lait et la viande collectés autour de l'usine de La Hague (Bq/kg C).

En surveillance de routine, des échantillons biologiques (végétaux annuels) permettent d'estimer la concentration moyenne du carbone 14 dans l'air, à partir de la mesure de leurs activités spécifiques (Bq/kg C), compte tenu d'une concentration de carbone – sous forme CO₂ – dans l'air de l'ordre de 0,2 g C/m³ d'air pour la décennie en cours.

Le carbone 14 dans le compartiment terrestre

C'est autour du site de La Hague que sont acquises la plupart des mesures de carbone 14 : des végétaux (herbe), du lait de vache et de la viande de bœuf ont été mesurés (figures II.33 et II.34). Tous les résultats sont évidemment plus élevés que le bruit de fond.

Les mesures d'herbe prélevée à Herqueville, au sud-ouest immédiat du site, varient de 262 ± 141 à 1 618 ± 194 Bq/kg C (112 à 696 Bq/kg sec). La variation de la concentration de l'herbe au cours de l'année dans une large gamme (près d'un facteur 10) a déjà été observée par l'IRSN sur sa station



expérimentale, située à deux kilomètres au nord du site de La Hague, destinée à paramétrer et à implémenter le modèle de transfert du carbone 14 Tocatta, et s'explique par les variations de concentrations dans l'air en fonction des fluctuations des directions de vents et des débits de rejet. Le lait présente des concentrations allant de 276 ± 17 à 427 ± 24 Bq/kg C (15 à 29 Bq/L de lait). Ces valeurs sont cohérentes avec celles acquises par Areva de juin 2011 à décembre 2012 (10 - 32 Bq/L, source RNM). La concentration du carbone 14 dans la

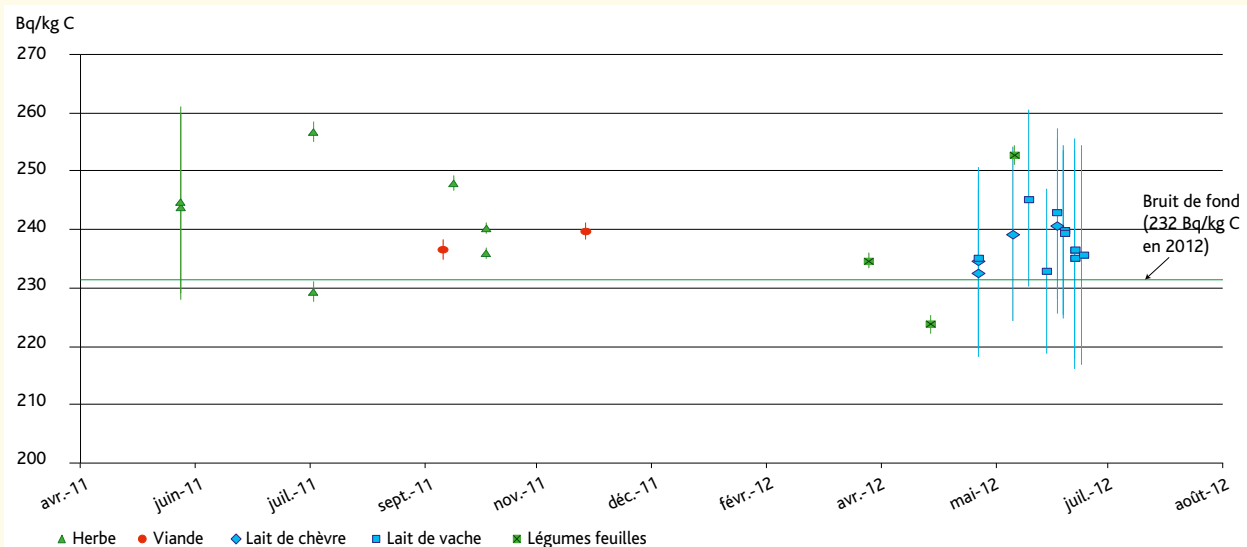
viande de bœuf se situe de $252 \pm 1,4$ à $351 \pm 2,4$ Bq/kg C (33 à 61 Bq/kg frais).

Des mesures sont également acquises au voisinage proche des CNPE et du centre CEA de Saclay (tableau II-2 et figure II-35), témoignant d'un renforcement modéré du bruit de fond avec des valeurs moyennes de carbone 14 de 240 Bq/kg C et n'excédant pas 260 Bq/kg C.

Échantillon	Unité	Date	Site voisin	Valeur
Viande	Bq/kg frais	sept-11	CNPE – Civaux	$36,5 \pm 0,3$
		nov-11	CNPE – Chooz	$25,5 \pm 0,2$
Lait de chèvre	Bq/L	mai-12	CNPE – Belleville-sur-Loire	$11,6 \pm 0,7$
		mai-12	CNPE – Tricastin	$12,3 \pm 0,8$
		juin-12	CNPE – Saint-Alban	$12,6 \pm 0,8$
Lait de vache	Bq/L	juin-12	CNPE – Le Blayais	$13,7 \pm 1,1$
		juin-12	CNPE – Le Bugey	$13,7 \pm 1,1$
		juin-12	CNPE – Fessenheim	$13,6 \pm 1,1$
		juin-12	CNPE – Civaux	$20,0 \pm 1,2$
		juin-12	CNPE – Saint-Laurent	$15,2 \pm 0,9$
		juin-12	CNPE – Gravelines	$14,3 \pm 0,9$
		juin-12	CNPE – Flamanville	$16,7 \pm 1,0$
		mai-12	CNPE – Chooz	$16,1 \pm 1,1$
Légumes feuilles	Bq/kg frais	mars-12	CNPE – Saint-Alban	$8,2 \pm 0,1$
		avr-12	CNPE – Nogent	$10,4 \pm 0,1$
		mai-12	CNPE – Penly	$4,7 \pm 0,1$
Herbe	Bq/kg sec	mai-11	CNPE – Tricastin	$129,8 \pm 8,5$
		oct-11	CNPE – Tricastin	$101,5 \pm 0,4$
		juil-11	CEA – Saclay	$104,8 \pm 0,7$
		sept-11	CEA – Saclay	$108,3 \pm 0,6$

■ **Tableau II.2** - Activités massiques ou volumiques du carbone 14 dans des échantillons prélevés au voisinage de CNPE et du centre CEA de Saclay.

■ **Figure II.35** - Activités spécifiques du carbone 14 dans l'herbe, le lait et la viande collectés au voisinage des CNPE et de Saclay (Bq/kg C).



Le carbone 14 dans le compartiment dulçaquicole

Les mesures du carbone 14 en milieu dulçaquicole sont rares et limitées, en général, aux compartiments biologiques. En 2011 et 2012, des échantillons de végétaux aquatiques et de poissons ont été prélevés sous influence (i. e., à l'aval immédiat du rejet) de quelques CNPE (tableau II.3). Les résultats de ces mesures montrent, sans surprise, une influence perceptible et variable des rejets des CNPE, en particulier dans les poissons, qui font partie des échantillons les plus aptes à incorporer (par voie trophique) le carbone 14.

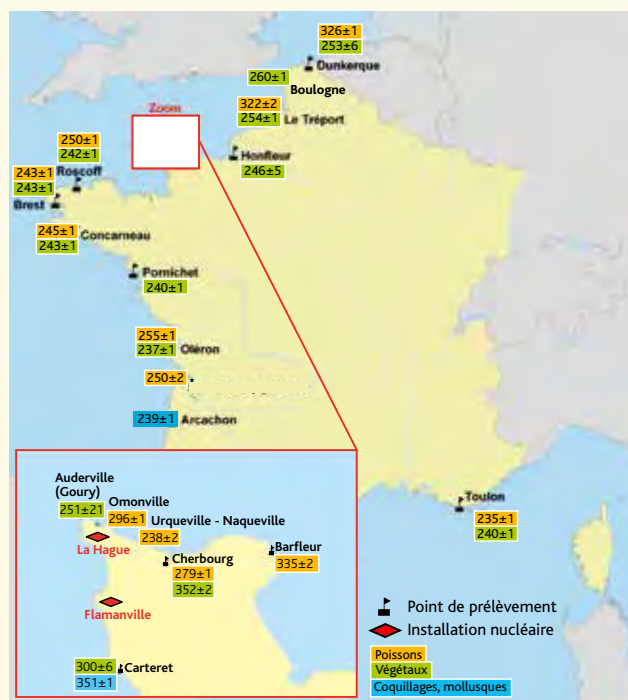
Le carbone 14 dans le compartiment aquatique marin

Des mesures de carbone 14 sont faites sur des échantillons de végétaux aquatiques (algues vertes ou brunes et posidonies),

de poissons (lotte, congre, roussette, plie...) prélevés le long du littoral (figure II.36).

Les végétaux (algues et posidonies) sont de bons indicateurs biologiques du marquage éventuel en carbone 14. Au vu des données acquises (tableau II.4 et figure II.37), on constate que les prélèvements situés à proximité des rejets de l'usine de La Hague (activités spécifiques supérieures à 300 Bq/kg C et jusqu'à 452 ± 2 Bq/kg C à Auderville) se démarquent nettement de ceux situés plus à l'est (de l'ordre de 250 à 260 Bq/kg C) ou de ceux localisés près de Flamanville, sur la côte ouest du cap de La Hague (300 Bq/kg C à Carteret). L'influence des rejets des CNPE, Gravelines en mer du Nord, Paluel et Penly en Manche, est plus ou moins occultée par ceux de La Hague et de Sellafeld, du fait de l'importance relative des rejets de ces installations et d'un sens général ouest/est de circulation des eaux. Toute cette zone présente des activités spécifiques supérieures au bruit de fond que l'on retrouve, en revanche, sur des échantillons prélevés sur la côte atlantique (Brest, Pornichet) et en Méditerranée (Toulon).

Végétaux aquatiques				
Date	Commune	Site nucléaire voisin	Bq/kg C	Bq/kg sec
31/05/2011	Bollène	CNPE Tricastin	275 ± 17 à 391 ± 23	88 ± 5 à 140 ± 8
12/10/2011	Bollène	CNPE Tricastin	261 ± 1 à 314 ± 2	$63 \pm 0,3$ à $91 \pm 0,5$
Poissons				
Date	Commune	Site nucléaire voisin	Bq/kg C	Bq/kg frais
23/06/2011	Civaux	CNPE Civaux	1372 ± 124	176 ± 16
10/08/2011	Bellegarde-sur-Valserine	CNPE Le Bugey	302 ± 2	$36 \pm 0,2$
30/09/2011	Fontaines-en-Sologne	CNPE Saint-Laurent	243 ± 2	$22 \pm 0,2$
21/05/2012	Bollène	CNPE Tricastin	253 ± 1	$30 \pm 0,2$
31/05/2012	Golfech	CNPE Golfech	350 ± 2	$48 \pm 0,3$



■ **Tableau II.3** - Activités spécifiques et activités massiques du carbone 14 dans des échantillons prélevés en milieu dulçaquicole au voisinage de quelques CNPE.

■ **Figure II.36** - Activité spécifique du carbone 14 dans les échantillons prélevés en mer ou le long du littoral (Bq/kg C).

La variabilité des mesures acquises sur **les poissons** (tableau II.5 et figure II.38, page 60) est en partie attribuable aux différences entre les espèces (en fonction de leur mode de vie et d'alimentation), à leur âge et à leurs déplacements éventuels. Néanmoins, on observe les mêmes tendances que celles constatées sur les algues, avec cependant des valeurs plus fluctuantes et, par exemple, une activité spécifique quasiment aussi élevée sur un échantillon de poisson pêché à Dunkerque ($326 \pm 1,4$ Bq/kg C) que celles relevées sur les échantillons situés le long du cap de La Hague (335 ± 1 Bq/kg C). Le long du littoral atlantique, le carbone 14 des échantillons de poissons est légèrement supérieur au bruit de fond hors influence d'un rejet : 255 ± 2 Bq/kg C à Oléron, à comparer à la valeur de 235 ± 1 Bq/kg C à Toulon.

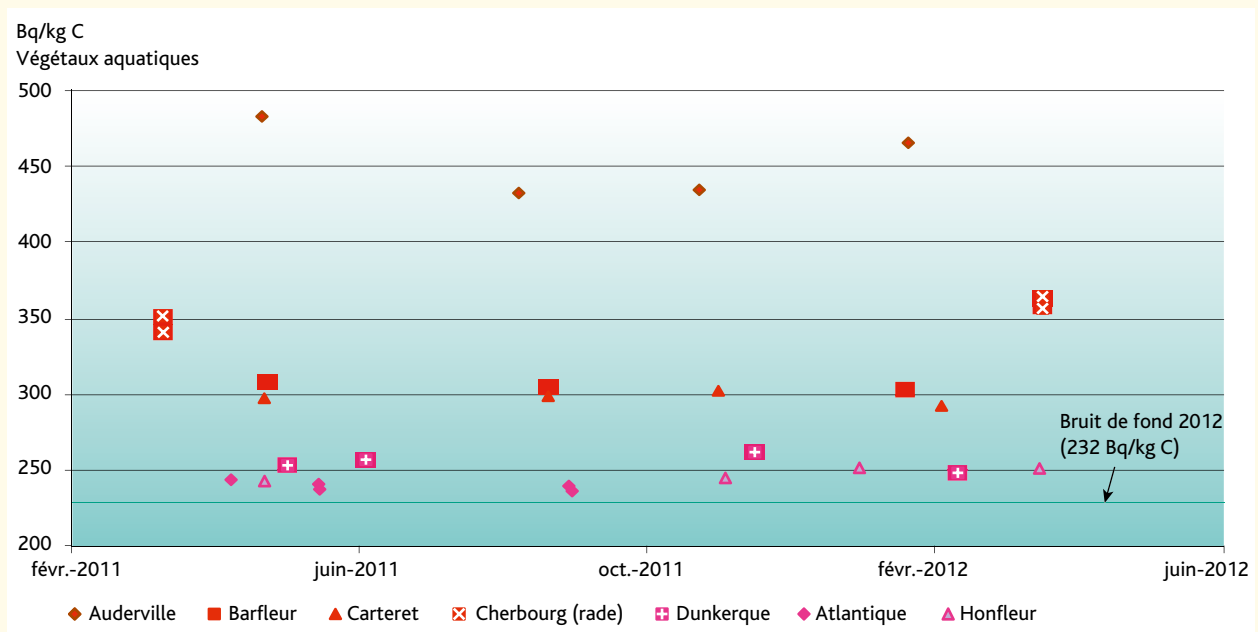
Concernant **les mollusques**, une valeur relativement élevée (351 ± 1 Bq/kg C) a été mesurée sur des bulots prélevés à Carteret, sur la côte ouest du cap de La Hague, à comparer aux résultats obtenus sur des huîtres d'Arcachon (239 ± 1 Bq/kg C).

Les échantillons de **sédiments marins** ont un intérêt limité en termes de surveillance de routine du carbone 14 : un prélèvement ponctuel, en surface du sédiment, ne peut pas être affecté avec certitude à une période de sédimentation ; les carottages, qui seuls permettent de tracer un historique des dépôts contaminants, nécessitent des dispositifs embarqués sur des navires hauturiers et sont réservés aux travaux de recherche. De plus, les teneurs en carbone organique des sédiments peuvent être très faibles, ce qui limite la détection du carbone 14, par les techniques usuelles, dans les échantillons prélevés. Les échantillons prélevés au voisinage du cap de La Hague en 2011 à Barfleur, Sciotot-les-Pieux et Herqueville ont en moyenne des teneurs en matière organique de 3,5 % et dans lesquels la concentration en carbone 14 est inférieure à 750 à 3 800 Bq/kg C, soit 33 à 85 Bq/kg sec.

Végétaux marins			
Localisation	Commune	Bq/kg C	Bq/kg sec
Mer du Nord	Dunkerque	253 ± 2	$72,9 \pm 0,5$
Manche	Wimereux (Boulogne)	261 ± 1	$86,8 \pm 0,5$
	Criel-sur-Mer (Le Tréport)	255 ± 1	$79,6 \pm 0,4$
	Honfleur	246 ± 2	$80,1 \pm 0,5$
	Barfleur	304 ± 2	$99,3 \pm 0,5$
	Cherbourg	353 ± 2	$113,6 \pm 0,7$
	Auderville (Goury)	452 ± 2	$157,6 \pm 0,7$
Atlantique	Saint-Georges-de-la-Rivière (Carteret)	301 ± 2	$103,2 \pm 0,5$
	Brest	244 ± 1	$86 \pm 0,5$
	Pornichet	240 ± 2	$80,2 \pm 0,5$
Méditerranée	Toulon	241 ± 1	$73,1 \pm 0,4$

■ **Tableau II.4** - Activités spécifiques et activités massiques du carbone 14 (valeurs moyennes) dans des échantillons de végétaux marins (fucus, ulves, posidonies) prélevés en mer du Nord, Manche, Atlantique et Méditerranée en 2011 et 2012 (Bq/kg C et Bq/kg sec).

■ **Figure II.37** - Activités spécifiques du carbone 14 dans les végétaux marins (Bq/kg C).



En résumé

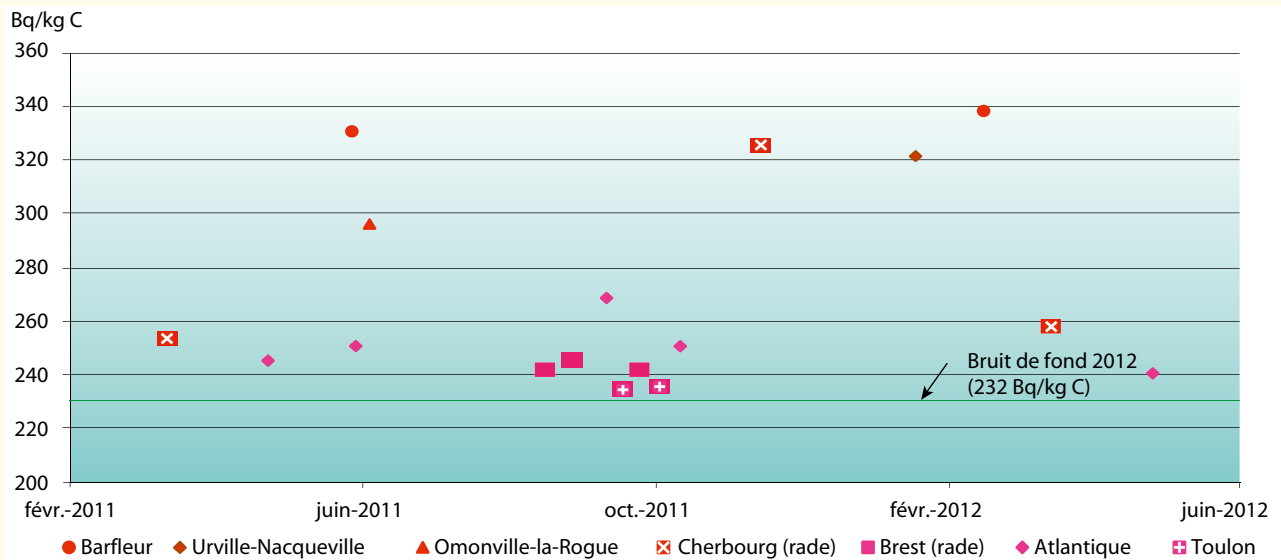
L'essentiel du carbone 14 actuellement mesuré dans l'environnement, hors de l'influence directe d'une installation, est d'origine naturelle (95 %) et, pour une part de plus en plus faible, imputable à la rémanence des tirs atmosphériques des années 1960 à 1980. L'ensemble des résultats de mesure du carbone 14 dans les échantillons prélevés ne montre aucune

anomalie par comparaison avec les données régulièrement acquises les années précédentes et avec celles produites par les exploitants. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec les niveaux de rejets des installations. En particulier, les poissons pêchés à proximité des CNPE installés sur les fleuves français ainsi que les végétaux prélevés à proximité des rejets de l'usine de La Hague présentent des activités relativement élevées, montrant l'influence perceptible de leurs rejets.

Poissons			
Localisation	Commune	Bq/kg C	Bq/kg frais
Mer du Nord	Dunkerque	326 ± 1	41,7 ± 0,2
Manche	Le Tréport	322 ± 2	36,9 ± 0,2
	Roscoff	251 ± 1	17 ± 0,1
	Barfleur	335 ± 1	44,4 ± 0,4
	Cherbourg	279 ± 2	27,2 ± 0,2
	Urville-Nacqueville	328 ± 1	33,6 ± 0,2
	Omonville-la-Rogue	297 ± 2	49,6 ± 0,3
Atlantique	Brest	243 ± 1	29 ± 0,2
	Concarneau	245 ± 2	24,3 ± 0,2
	Saint-Pierre-d'Oléron	255 ± 2	31,3 ± 0,2
	Saint-Christoly-Médoc	251 ± 2	38,3 ± 0,4
Méditerranée	Toulon	235 ± 1	38 ± 0,2
Mollusques			
Localisation	Commune	Bq/kg C	Bq/kg frais
Manche	Barneville-Carteret Bulots	351 ± 1	37,5 ± 0,2
Atlantique	Arcachon Huîtres	239 ± 1	10,5 ± 0,1

■ **Tableau II.5** - Activités spécifiques et activités massiques du carbone 14 (valeurs moyennes) dans des échantillons de poissons (lotte, congre, roussette, plie...) et de mollusques (bulots et huîtres) prélevés en mer du Nord, Manche, Atlantique et Méditerranée en 2011 et 2012 (Bq/kg C et Bq/kg frais).

■ **Figure II.38** - Activités spécifiques du carbone 14 dans les poissons de mer (Bq 14C/kg C).



II.5 LES CÉSIIUMS 134 ET 137

Généralités

Le césium est le plus rare des métaux alcalins présents dans l'écorce terrestre. Dans la biosphère, le césium se trouve essentiellement sous forme de cation Cs^+ et est l'analogue chimique du potassium, facteurs qui conditionnent sa mobilité et son transfert. Sa forte affinité pour les argiles (illites) explique que le sol et les sédiments en sont les principaux compartiments accumulateurs.

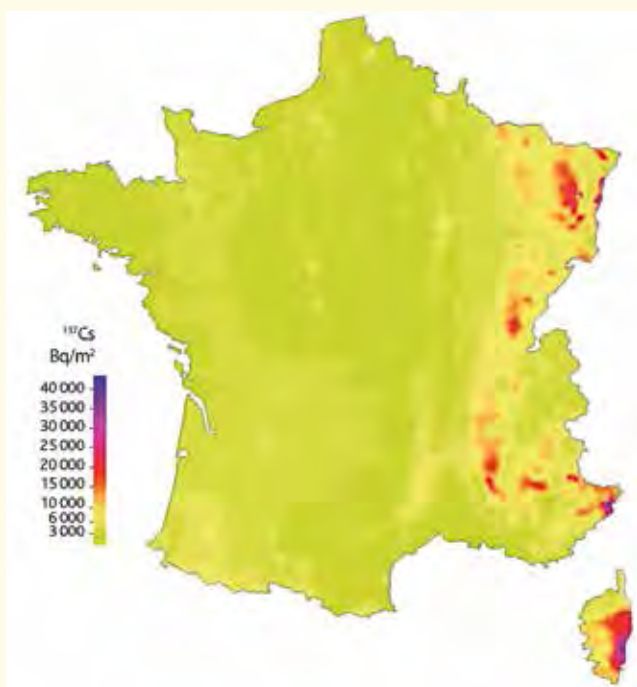
La présence des isotopes radioactifs du césium dans l'environnement est liée aux activités humaines. Elle résulte notamment des essais nucléaires atmosphériques et des rejets accidentels (Tchernobyl). Pendant la période 1945-1980, **les essais nucléaires atmosphériques** ont libéré dans l'environnement une quantité de césium 137 estimée à 948 PBq, qui s'était peu à peu déposée sur l'ensemble de la planète. Après avoir atteint son maximum de 4 000 Bq/m² en 1963, l'activité surfacique des sols a ensuite lentement diminué après l'arrêt des essais américains et soviétiques, par décroissance radioactive ainsi que par des processus de dilution et de migration.

Les rejets accidentels et notamment ceux émis dans l'environnement lors de **l'accident de Tchernobyl en 1986** ont également conduit à libérer dans l'environnement des isotopes radioactifs du césium. L'activité du césium 137 émis lors de cet accident a été estimée à 85 PBq. L'accident de Tchernobyl a conduit en mai 1986 à des dépôts hétérogènes sur le territoire. Aujourd'hui, les concentrations de césium 137 peuvent ainsi varier de près de deux ordres de grandeur en fonction des

dépôts radioactifs initiaux : les deux tiers ouest du territoire présentent des dépôts homogènes et inférieurs à 5 000 Bq/m², alors que dans la partie est du pays, les dépôts sont très hétérogènes et peuvent encore atteindre aujourd'hui plusieurs dizaines de milliers de Bq/m² (figure II.39).

Le césium 137 est également présent dans les **rejets de certaines installations nucléaires en fonctionnement normal** (centrales nucléaires, installations de traitement du combustible usé et centres de recherche). Le cœur d'un réacteur de 1 300 MWe contient en fin de cycle environ 4.10¹⁷ Bq de césium confiné à l'intérieur du combustible. En fonctionnement normal, une faible fraction de ce césium est rejetée dans l'environnement. En 2012, les activités en césiums 137 et 134 dans les effluents liquides des centrales nucléaires étaient respectivement de 0,463 GBq et 0,322 GBq, soit 5,54 % de l'activité totale liée aux produits de fission et des produits d'activation présents dans ces rejets. Lors des opérations de traitement du combustible irradié, le césium 137 est extrait avec les autres produits de fission. En 1999, les rejets de césium 137 de l'usine de traitement du combustible de La Hague s'élevaient à 1,3 TBq et ceux de l'usine de Sellafield au Royaume-Uni à 7,9 TBq, en quasi-totalité sous forme liquide. Ces rejets sont en diminution : en 2011, ils étaient de 0,752 TBq pour l'usine de traitement de La Hague et de 5 TBq pour Sellafield (RIFE, 2011). Les césiums 134 et 135 sont également présents dans les rejets liquides et gazeux issus des différentes étapes de traitement du combustible usé mais à des activités bien moindres.

Il n'est presque jamais possible de déceler les conséquences des rejets des installations nucléaires en fonctionnement normal dans l'environnement terrestre car elles sont très largement masquées par la rémanence des retombées anciennes (essais atmosphériques, accident de Tchernobyl).



■ **Figure II.39** - Activités surfaciques estimées de césium 137 présentes dans les sols français en 2006 (en Bq/m²).

Le césium 137, qui a une période de 30,2 ans, est l'isotope pour lequel les études, expérimentations et mesures *in situ* sont les plus abondantes. C'est aussi l'isotope qui reste le plus souvent mesuré dans l'environnement, en dépit de sa diminution depuis 1986 (décroissance radioactive des dépôts, dilution dans les différents compartiments de l'environnement, baisse des rejets des installations nucléaires). Le césium 137 est facilement mesuré par spectrométrie gamma à partir de la raie d'émission de son fils, le baryum 137m, émetteur gamma.

Le césium 134, dont la période radioactive est de 2,2 ans, contribuerait également à l'exposition des populations en cas d'accident mais à un degré moindre que le césium 137. Après quelques années, il disparaît complètement par décroissance radioactive. La détermination de l'activité des césiums 134 et 137 est réalisée par spectrométrie gamma. Pour cela, les échantillons sont conditionnés dans des géométries de comptage (récipients spécifiques pour l'étape de comptage). Ils sont ensuite mesurés à l'aide de détecteurs Ge HP (germanium hyper pur) calibrés avec des étalons multi-gammas de géométrie équivalente à celle de l'échantillon mesuré. Selon les radionucléides et les performances recherchés, les échantillons sont conditionnés soit à l'état frais, sec ou calciné.

Le césium dans l'atmosphère

Dans l'atmosphère, le césium 137 est présent sous forme particulaire et se fixe sur les poussières en suspension (aérosols). Parmi les nombreux radionucléides artificiels relâchés dans

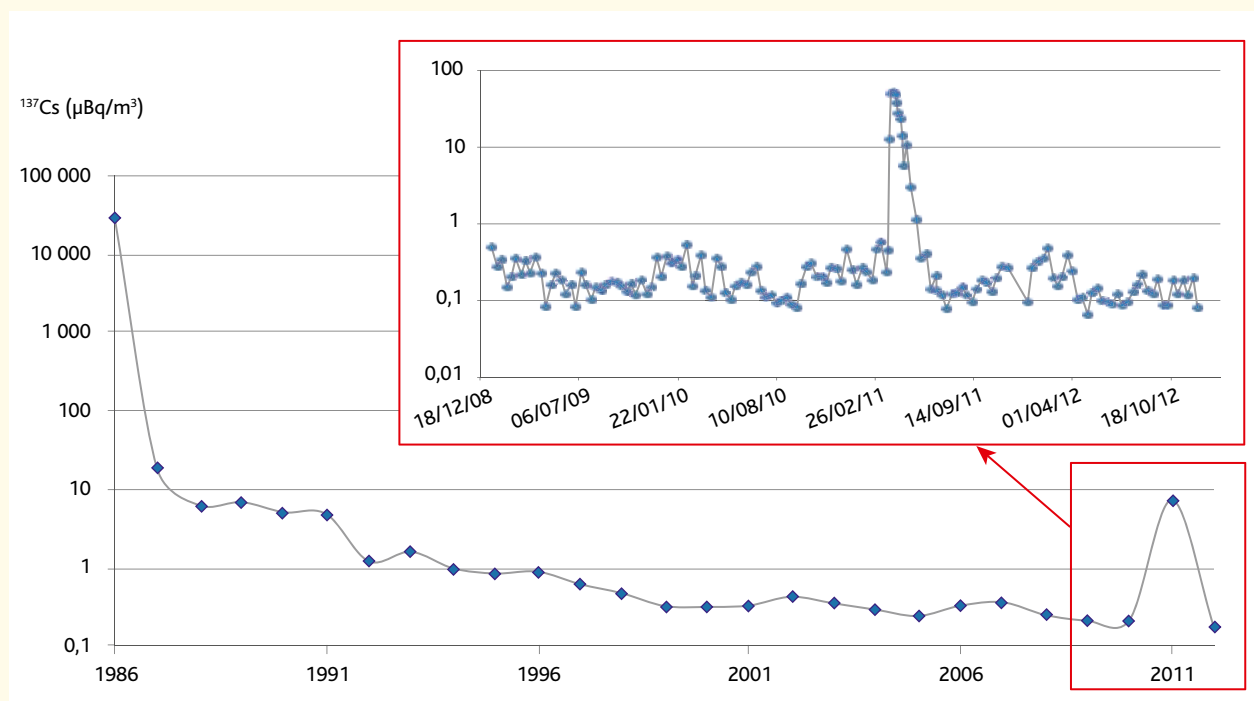
l'environnement, le césium 137 est l'indicateur privilégié de l'évolution de la radioactivité artificielle dans l'atmosphère.

Les expérimentations d'armes nucléaires ont justifié la mise en place dès 1958 d'un réseau de mesure de la radioactivité des aérosols qui s'est ensuite renforcé suite au développement progressif de l'industrie nucléaire en France. L'arrêt des essais atmosphériques et la baisse des niveaux d'activité des effluents industriels se sont traduits par une décroissance régulière au cours du temps de la radioactivité artificielle au sein des différentes composantes de l'environnement. À ce titre, le césium 137 a été utilisé comme traceur biogéochimique des processus naturels jouant un rôle dans la distribution des polluants atmosphériques tels que le lessivage des aérosols par la pluie et leurs dépôts au sol.

Depuis l'accident de Tchernobyl en 1986, les niveaux de césium 137 dans l'air n'ont cessé de diminuer requérant d'améliorer les dispositifs de prélèvement et de mesure. Partant en France d'un niveau de l'ordre de 10 000 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ en mai 86 en césium 137, ce stock a considérablement diminué (de plusieurs ordres de grandeur) au cours des deux années qui ont suivi l'accident de Tchernobyl jusqu'à des niveaux inférieurs à 10 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, témoignant ainsi du potentiel de lessivage de l'atmosphère (figure II.40).

De 1988 à 2000, la remise en suspension par érosion éolienne du césium 137 accumulé à la surface des sols a néanmoins ralenti cette diminution. Il aura fallu attendre environ 12 ans pour que le niveau d'activité en césium 137 soit équivalent

■ Figure II.40 - Activité moyenne (métropole) en césium 137 dans les aérosols atmosphériques de 1986 à 2012 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).



à celui enregistré la veille de l'accident (environ $1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). L'incident d'Algésiras, survenu fin mai 1998 en Espagne, a conduit à une augmentation très brève des niveaux d'activité sur deux jours mais, à la différence de Tchernobyl, la quantité de becquerels rejetés n'a eu aucune incidence sur l'évolution de la décroissance des niveaux à plus longue échéance.

Depuis 2000 et à l'exception de la courte période faiblement marquée par les retombées en France de l'accident de Fukushima, le césium 137 n'est plus présent qu'à l'état de traces dans l'atmosphère (quelques dixièmes de $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) et l'on constate peu de variations d'une année à l'autre. Cet équilibre moyen reflète celui entre les apports au milieu atmosphérique par remise en suspension et les pertes par dépôt (sec ou humide).

Les données acquises en 2011 et 2012 par les stations « très grand débit » du réseau Opera-Air montrent une augmentation de l'activité en césiums 137 et 134 des masses d'air consécutive à l'accident de Fukushima. En France, le niveau le plus élevé n'a pas dépassé $0,3 \text{ mBq}/\text{m}^3$ pour chacun de ces deux isotopes avec un rapport isotopique césium 137/césium 134 proche de 1, représentatif des rejets atmosphériques provoqués par l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima.

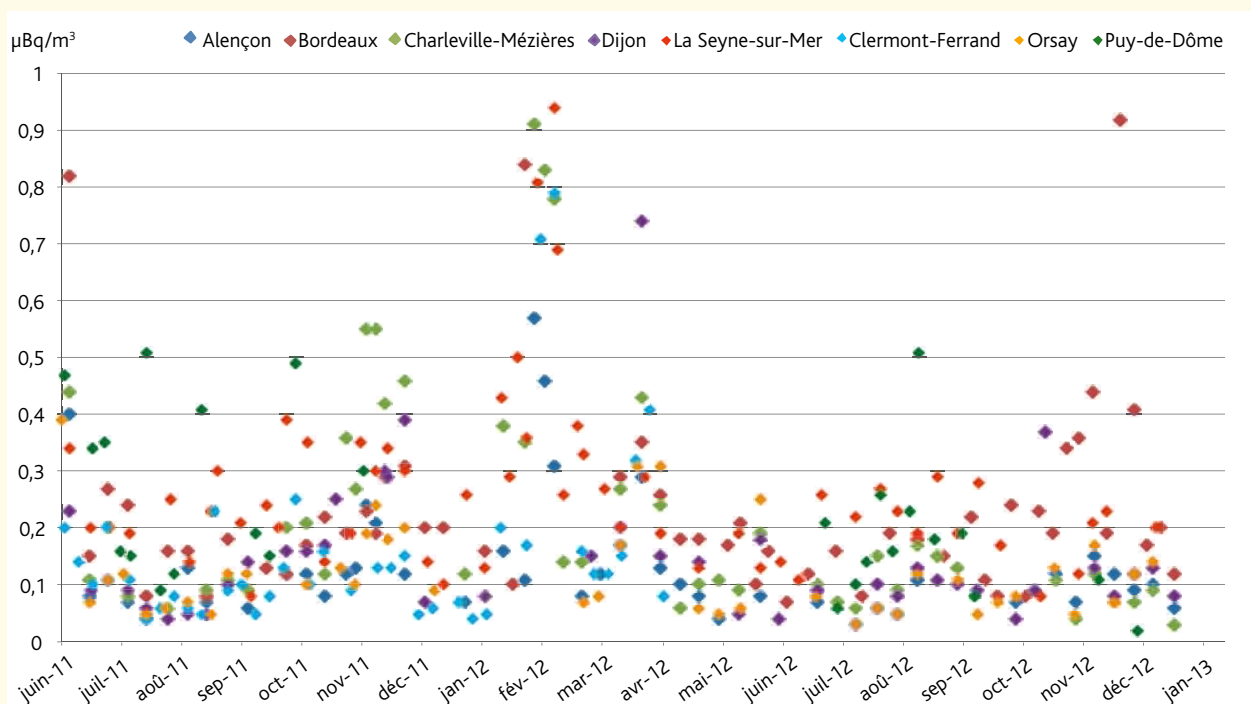
Les rejets de césium 137 provoqués par l'accident de Fukushima (moins de 10 % de ceux de l'accident de Tchernobyl) et leur dispersion sur plus de 10 000 km ont conduit à multiplier en France par un facteur 1 000 le niveau ambiant des jours précédant l'accident. Ces quantités

n'étaient pas suffisantes pour recharger durablement le stock de césium 137 atmosphérique puisque l'activité volumique de ce radionucléide dans l'air est revenue aux niveaux mesurés avant l'accident en moins de six mois (*figure II.40*).

Dans l'atmosphère, l'activité volumique du césium 137 dans l'air en France est, à la fin de l'année 2012, de l'ordre de $0,2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle (*figure II.41*). Les petites augmentations en césium 137 observées en période hivernale sont habituelles et peuvent être rattachées à des inversions du gradient de température dans les basses couches, éventuellement combinées à des rejets de cendres dans l'atmosphère en provenance des foyers utilisant du bois comme combustible et/ou à des feux de biomasse liés à des pratiques agricoles. Actuellement, compte tenu de ce bruit de fond ambiant très bas, le suivi de ces fluctuations est accessible uniquement par les systèmes « très grand débit » (TGD) permettant la filtration d'un volume d'air de plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes (*voir chapitre I*). Sur cette même période, aucune activité volumique significative en césium 137 et 134 n'a été mesurée par les stations « bas débit » du réseau Opera-Air.

À la composante locale de remise en suspension de particules peut se superposer ponctuellement une composante lointaine. Ainsi, une attention particulière est apportée depuis quelques années aux mécanismes singuliers de transport à longue distance comme les épisodes de poussières sahariennes. Le rôle de ces mécanismes était auparavant masqué par l'importance des retombées atmosphériques.

Figure II.41 - Activités en césium 137 dans les aérosols atmosphériques prélevés par les stations « très grand débit » implantées en métropole, de juin 2011 à décembre 2012 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).



Le césium dans le milieu terrestre

Dans les écosystèmes terrestres, le césium est en général très peu mobile dans les sols. Le transfert racinaire aux végétaux est assez faible et très dépendant du pH et de la teneur en matière organique. Le césium est très mobile dans les végétaux, rapidement absorbé par voie foliaire et facilement déplacé par translocation dans la plante. Le césium est transféré aux animaux par ingestion, avec des facteurs de transfert très variables selon les espèces et, en général, plus élevés pour la viande que pour le lait. Le césium 137 reste encore mesurable dans la plupart des matrices terrestres. Ses concentrations peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur en fonction des dépôts initiaux et d'autres paramètres agro-climatiques. Les zones de plaine présentent des niveaux de césium 137 plus faibles que l'est de la France ou que les zones d'altitude et des points « chauds » sont encore présents notamment à l'extrême sud-est ainsi que dans les Vosges et le Jura. Les champignons de ces massifs peuvent encore présenter des activités supérieures à 100 Bq/kg frais (*figure II.42*).

En milieu continental, le césium 134 rémanent des dépôts anciens (tirs atmosphériques, accident de Tchernobyl) n'est plus détectable depuis plusieurs années. Jusqu'en 1999, la présence du césium 134 permettait de montrer, par le rapport d'activité des deux radiocésiums, que le césium 137 provenait majoritairement des retombées de l'accident de Tchernobyl.

Le césium 134 provenant des dépôts infimes liés à l'accident de Fukushima, n'a été détecté que sporadiquement et temporairement en mars 2011 à des activités maximales de l'ordre de 0,5 Bq/kg frais dans les végétaux et de 0,1 Bq/L dans le lait. Les niveaux d'activité de césium 134 mesurés sur des échantillons de faune et de flore terrestres ainsi que de denrées alimentaires, entre juillet 2011 et décembre 2012, sont tous inférieurs aux limites de détection.

Les niveaux d'activités en césium 137 mesurés dans les sols sont compris entre 1,3 et 63 Bq/kg sec, l'hétérogénéité des dépôts à l'échelle du territoire étant l'une des causes de cette disparité. Entre juillet 2011 et décembre 2012, le césium 137 est systématiquement mesuré dans les champignons. Les activités mesurées (entre 1 et 100 Bq/kg frais) sont conformes aux activités habituellement observées et varient selon l'origine géographique et l'espèce prélevée (*figure II.43*).

En raison notamment du contenu élevé en matières organiques et de la faible capacité d'échange de la plupart des sols de forêt, le césium a une plus grande biodisponibilité dans le milieu forestier. Présent dans cet écosystème, il entre dans la chaîne alimentaire animale et humaine par la consommation des champignons, des baies et du gibier. Ainsi, le césium 137 a été détecté dans 57 % des prélèvements de viande de gibier (cerf...) à des niveaux inférieurs à 2 Bq/kg frais. À titre de comparaison, les résultats des mesures réalisées en 2012 sur six échantillons de viande de bœuf sont tous inférieurs aux limites de détection.

Dans les fruits, les légumes, l'herbe, la viande et le lait, les fréquences de détection et les niveaux d'activités mesurés sont beaucoup plus faibles. Il s'agit ici de l'effet résultant des différents modes de transferts de ce radionucléide dont le sol est maintenant la principale source. Entre juillet 2011 et décembre 2012, la fréquence de détection du césium 137 est de 4 % dans l'herbe (2/50), de 6 % dans les légumes (5/79) et de 1,6 % dans le lait (6/372). Les activités mesurées sont conformes aux niveaux habituellement observés dans ces échantillons (*tableau II.6*). Dans les fruits (14 mesures), le vin (20 mesures), les céréales (57 mesures) et le miel (3 mesures), les résultats des mesures réalisées sont tous inférieurs aux limites de détection.

■ *Figure II.42 - Gammes de concentrations du césium 137 en milieu terrestre hors influence d'une installation (en Bq/kg frais, sauf pour les sols en Bq/kg sec). Les zones plus sombres correspondent à des maximums mesurables dans des conditions particulières.*

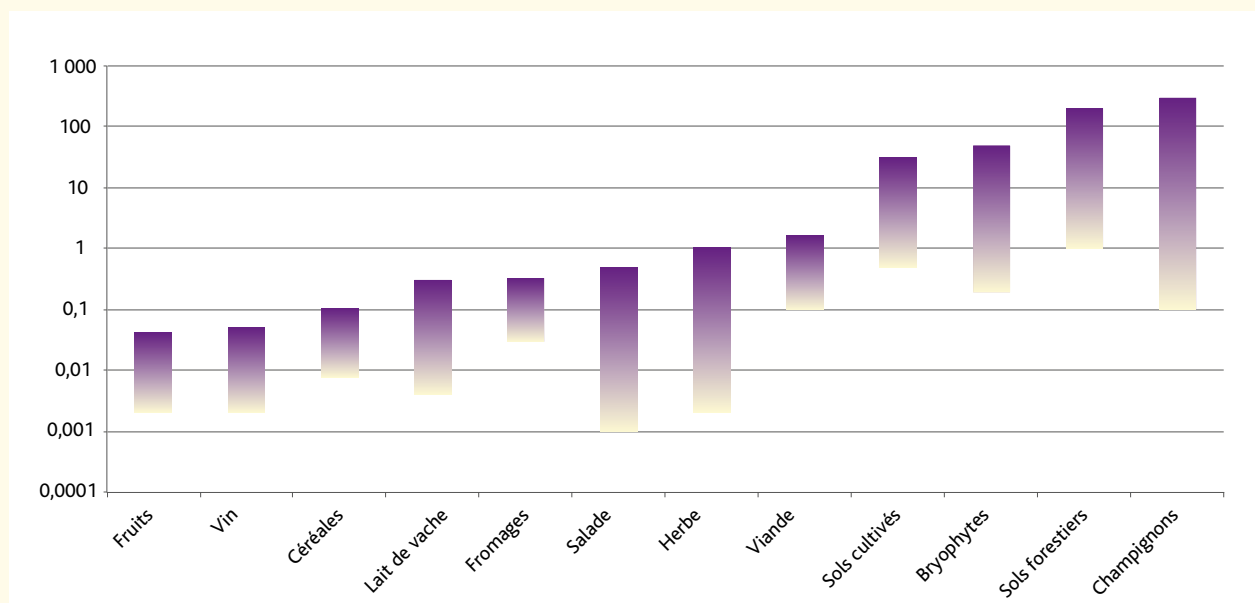


Figure II.43 - Prélèvements terrestres, réalisés entre juillet 2011 et décembre 2012, ayant fait l'objet d'une analyse par spectrométrie gamma.

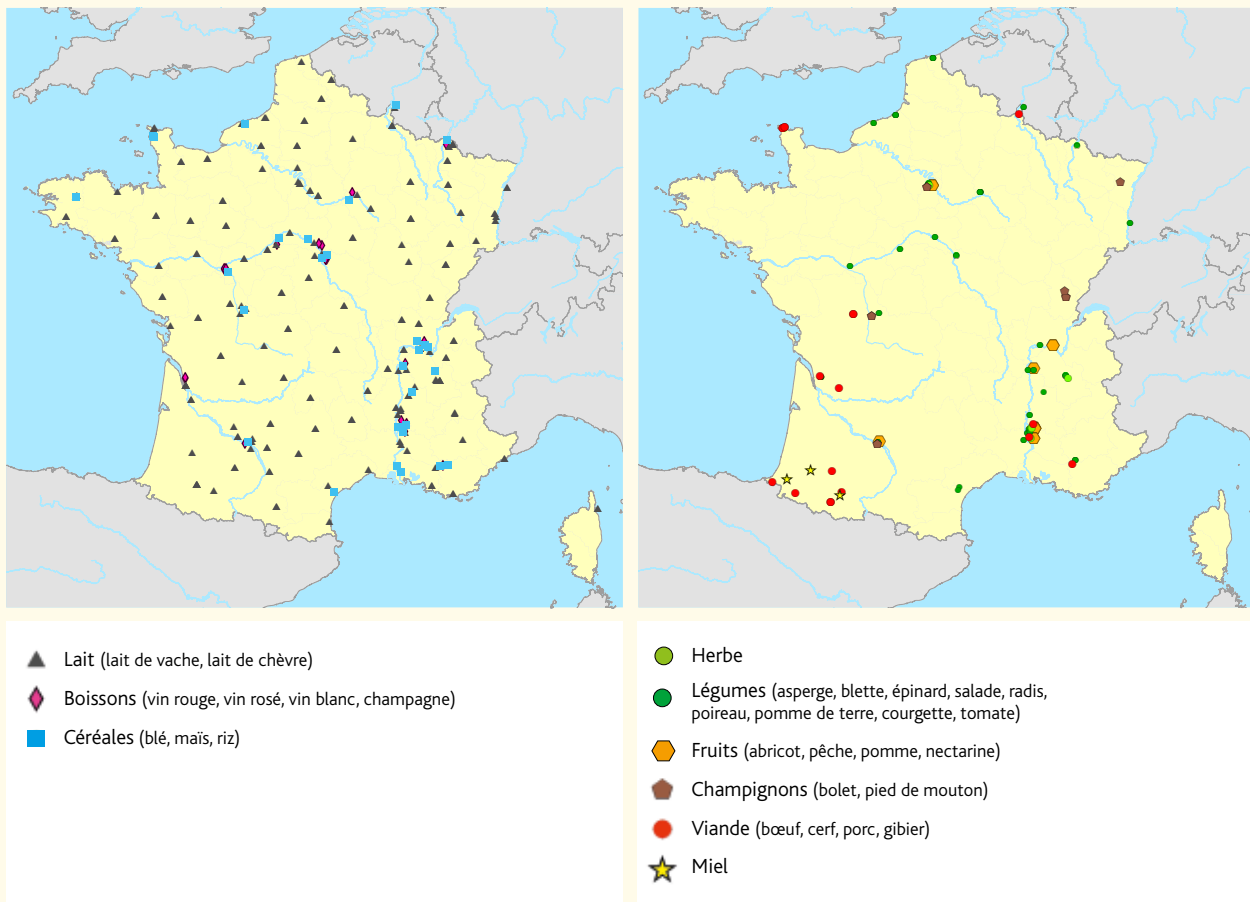


Tableau II.6 - Évolution des niveaux d'activité du césium 137 dans différentes matrices du compartiment terrestre entre mai 1986 et décembre 2012 (Bq/L, Bq/kg frais ou Bq/kg sec).

Type de denrée	Accident de Tchernobyl 26 avril 1986		Accident de Fukushima 11 mars 2011	
	Mai 1986	Avant Fukushima	Avril 2011	Juin 2011 – Décembre 2012
Lait de vache	100 Bq/L**	0,07 – 1,2 Bq/L	0,6 Bq/L**	1 Bq/L**
Viande de bœuf	1 000 Bq/kg frais**	0,05 – 0,1 Bq/kg frais	0,2 Bq/kg frais**	< 0,2 Bq/kg frais
Légumes feuilles	1 000 Bq/kg frais**	0,02 – 0,8 Bq/kg frais	1,2 Bq/kg frais**	0,3 Bq/kg frais**
Fruits	Quelques dizaines à quelques centaines de Bq/kg frais*	< 0,1 Bq/kg frais	< 0,1 Bq/kg frais	< 0,1 Bq/kg frais
Céréales	Quelques dizaines de Bq/kg frais*	< 0,5 Bq/kg sec	-	< 0,5 Bq/kg sec
Gibier	Quelques milliers de Bq/kg frais dans les zones les plus contaminées*	Quelques Bq/kg frais*	-	1,6 Bq/kg frais**
Champignons	Quelques milliers de Bq/kg frais dans les zones les plus contaminées*	Quelques dizaines à quelques centaines de Bq/kg frais*	-	100 Bq/kg frais**

* Les valeurs mesurées diffèrent suivant l'origine géographique et le type de produit concerné
 ** Valeur maximale mesurée

L'apport en césium 137 lié aux retombées atmosphériques de l'accident de Fukushima n'a pas impacté de façon mesurable les niveaux présents dans l'environnement terrestre (tableau II.6, page 65). Seule la présence du césium 134 (non détectable avant cet accident) dans quelques échantillons de lait et de végétaux a permis d'observer pendant quelques jours seulement les dépôts liés à cet accident à des niveaux très faibles proches des limites de détection.

Le césium dans le milieu aquatique continental

En eau douce, la mobilité du césium est conditionnée par sa forte affinité avec les minéraux argileux des matières en suspension et des sédiments où il s'accumule. Les concentrations des eaux de surface filtrées sont généralement inférieures aux limites de détection. Les espèces végétales assurant la production primaire constituent le maillon le plus important pour son entrée dans les chaînes alimentaires. Chez les animaux aquatiques, il est transféré surtout par ingestion. Les facteurs de transfert aux poissons varient de 1 000 à 10 000 Bq/kg frais de muscle par Bq/L d'eau.

Les fleuves et les rivières sont les vecteurs privilégiés de matériel à l'état dissous et particulaire. Actuellement, à l'échelle globale, les fleuves contribuent pour près de 90 % aux transferts de matière à l'océan. Les concentrations en éléments dissous dans les cours d'eau ont pour origine les apports atmosphériques par voie humide et sèche et l'altération des roches du bassin versant. Les flux de matière particulaire sont, quant à eux, issus de l'érosion mécanique. Celle-ci est en grande partie générée par l'action de l'eau s'écoulant à la surface d'un bassin versant et se traduit par le transport des particules arrachées par l'impact de la pluie. Les berges, le lit et la plaine d'inondation des cours d'eau constituent ensuite de nouvelles sources de sédiments.

Tableau II.7 - Activités moyennes pondérées du césium 137 dans les matières en suspension prélevées dans les eaux de surface entre juillet 2011 et décembre 2012 (Bq/kg sec).

Fleuve ou rivière	Station	Localisation par rapport aux CNPE	Activité moyenne pondérée en ¹³⁷ Cs (Bq/kg sec)
Seine	Nogent-sur-Seine	Aval CNPE de Nogent-sur-Seine	2,79 ± 0,17
	Croissy-sur-Seine	Aval Paris	4,31 ± 0,29
Loire	Châtillon-sur-Loire	Aval CNPE de Belleville-sur-Loire	1,62 ± 0,12
	Ouzouer-sur-Loire	Aval CNPE de Dampierre-en-Burly	4,08 ± 0,41
	Muides-sur-Loire	Aval CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux	6,08 ± 0,45
	Candes-Saint-Martin	Aval CNPE de Chinon	3,79 ± 0,27
	Les Ponts-de-Cé	Aval Loire	6,62 ± 0,41
Vienne	Bonneuil-Matours	Aval CNPE de Civaux	11,8 ± 0,5
Garonne	Saint-Romain-le-Noble	Aval CNPE de Golfech	3,75 ± 0,22
Gironde	Braud-et-Saint-Louis	Aval CNPE du Blayais	3,85 ± 0,15
Rhône	Bouvesse-Quirieu	Aval CNPE de Creys-Malville	3,46 ± 0,19
	Loyettes	Aval CNPE du Bugey	3,51 ± 0,16
	Saint-Pierre-de-Boëuf	Aval CNPE de Saint-Alban	7,42 ± 0,31
	Rochemaure	Aval CNPE de Cruas-Meysse	4,3 ± 0,16
	Bollène	Aval CNPE du Tricastin	3,53 ± 0,21
	Vallabrègues	Aval Rhône	6,62 ± 0,3
Meuse	Rancennes	Aval CNPE de Chooz	6,8 ± 0,33
Moselle	Berg-sur-Moselle	Aval CNPE de Cattenom	6,56 ± 0,37
Grand Canal d'Alsace	Kembs	Amont CNPE de Fessenheim	5,64 ± 0,29
	Vogelgrun	Aval CNPE de Fessenheim	2,46 ± 0,15

Eau et matières en suspension

Dans les eaux, entre juillet 2011 et décembre 2012, aucune activité significative en césium 134 n'a été observée sur les 750 mesures effectuées. De même, les résultats des 247 mesures de césium 137 réalisées sur les eaux de surface prélevées en aval des principales installations nucléaires, dans le cadre de la surveillance des fleuves et des rivières (*chapitre I.3*), sont tous inférieurs aux limites de détection (0,025 à 0,25 Bq/L).

En complément des analyses réalisées sur la fraction liquide, des mesures de spectrométrie gamma sont effectuées sur les matières en suspension (MES) sur lesquelles s'adsorbent de nombreux radionucléides. Les MES sont collectées après décantation au niveau de chacun des hydrocollecteurs placés dans le cours d'eau en aval du point de rejet des effluents liquides des CNPE.

Un marquage résiduel en césium 137 des MES est systématiquement observé dans chaque cours d'eau (*tableau II.7*). Les concentrations moyennes mesurées (entre 1,62 et 7,42 Bq/kg sec) ne

montrent pas de différence notable avec celles enregistrées les années antérieures. De plus, elles ne sont pas significativement différentes de celles mesurées dans des zones non influencées par les rejets des CNPE. L'influence des rejets en césium d'origine industrielle dans les cours d'eau n'est donc plus détectable et se situe actuellement dans le bruit de fond généré par les apports terrigènes liés au drainage des sols des bassins versants marqués par les retombées atmosphériques et soumis à l'érosion.

Sédiments

Le césium 137 est mesuré systématiquement dans tous les sédiments prélevés sur le territoire français dans les fleuves et les rivières à proximité des principales installations nucléaires (La Hague, Tricastin, Marcoule, Saclay, Bruyères-le-Châtel, Grenoble, Cadarache). Sa présence trouve son origine essentiellement dans les retombées atmosphériques passées. Des échantillons de sédiment ont été prélevés sur plusieurs stations disposées le long du Rhône, depuis Pierrelatte (en amont du site industriel du Tricastin) jusqu'à l'embouchure du Grand-Rhône et du Petit-Rhône (*figure II.44*).



Figure II.44 - Activités moyennes pondérées du césium 137 dans les sédiments prélevés dans le Rhône et ses affluents depuis Pierrelatte (en amont du site industriel du Tricastin) jusqu'à l'embouchure du Rhône (Bq/kg sec).

À proximité du site du Tricastin (figure II.45), l'activité massique du césium 137 des échantillons prélevés en amont (entre 2,3 et 4 Bq/kg sec) et des échantillons prélevés en aval (entre 1,4 et 4,8 Bq/kg sec) est équivalente. Les activités mesurées en aval du site de Marcoule, principalement aux stations de Codolet, station la plus proche de l'émissaire de rejets d'effluents liquides du site de Marcoule (entre 25 et 100 Bq/kg sec) puis d'Avignon (11 Bq/kg sec) sont sensiblement plus élevées que celles observées le long du Rhône en amont. Pour mémoire, les rejets de césium 137 dans les effluents liquides du site de Marcoule étaient de 23,3 GBq en 2012. Outre la persistance dans l'environnement du césium 137 issu des essais atmosphériques d'engins nucléaires de 1945 à 1980, un marquage par les rejets du site, présents et passés, ne peut donc être exclu pour ce radionucléide. Au-delà de la station d'Avignon, les activités massiques en césium 137 mesurées en Camargue sur le grand Rhône et le petit Rhône sont homogènes (entre 6,3 et 7,3 Bq/kg sec).

Des prélèvements de sédiments sont réalisés chaque semestre dans les ruisseaux de la Sainte-Hélène, des Landes et des Moulinets, à proximité du site de La Hague. Le césium 137 est détecté dans l'ensemble des échantillons à des

activités moyennes comprises entre 2,54 et 55 Bq/kg sec. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus les années précédentes (tableau II.8). La présence de ce radionucléide dans les sédiments de rivière est attribuable aux rejets atmosphériques du site, essentiellement passés, ainsi qu'aux retombées atmosphériques issues des essais atmosphériques et de Tchernobyl.

Des prélèvements de sédiments sont également réalisés en aval des principaux sites de recherche du CEA (Saclay, Bruyères-le-Châtel, Cadarache) et de l'Institut Laue-Langevin à Grenoble. Concernant le site de Cadarache, les prélèvements de sédiments sont réalisés dans la Durance à 400 mètres en aval du point de rejet des effluents liquides. L'activité moyenne pondérée en césium 137 mesurée en 2011-2012 ($1,14 \pm 0,11$ Bq/kg sec) est proche des niveaux observés ces dernières années (entre 1 et 5 Bq/kg sec). Compte tenu des faibles niveaux de césium 137 rejetés dans les effluents liquides du site de Cadarache (< 10 Bq/L dans les effluents avant rejet dans la Durance), la présence de ce radionucléide dans les sédiments s'explique principalement par la rémanence due aux retombées atmosphériques (tirs aériens d'armes nucléaires et accident de Tchernobyl).



© Noak/Le bar Floréal/IRSN

■ Figure II.45 - Prélèvement de sédiments (technique du cône de Berthois) effectué dans la Caffière en aval du site nucléaire du Tricastin.

Des prélèvements semestriels de sédiments sont réalisés à proximité du centre de Saclay. Cette surveillance inclut notamment des prélèvements au niveau de l'aqueduc des Mineurs via lequel transitent les rejets d'effluents liquides du centre de Saclay avant leur déversement dans l'Étang Vieux, milieu récepteur de ces rejets.

Comme les années précédentes, on observe un marquage rémanent des sédiments de l'aqueduc des Mineurs par le césium 137 (activité moyenne pondérée de $30 \pm 3,2$ Bq/kg sec) imputable aux rejets passés d'effluents liquides du site, bien que l'activité massique moyenne annuelle en césium 137 rejetée ait été réduite de plus d'un facteur 100 depuis 1990.

Deux points de prélèvements de sédiments ont été retenus pour assurer la surveillance du site CEA de Bruyères-le-Châtel, dans le ruisseau Le Grand Rué et dans la Rémarde. Les activités moyennes en césium 137 mesurées (respectivement $0,92 \pm 0,23$ et $1,84 \pm 0,33$ Bq/kg sec), comparables à celles mesurées depuis 2008, sont imputables aux retombées passées des tirs atmosphériques.

La surveillance des centres de recherche de l'Institut Laue-Langevin (ILL) et du CEA de Grenoble est commune à ces deux sites. Des prélèvements de sédiments sont effectués dans l'Isère en amont et en aval du point de rejet. Le césium 137 est décelable dans l'ensemble des prélèvements (activité moyenne pondérée de $0,84 \pm 0,15$ Bq/kg sec en amont et $2,26 \pm 0,25$ Bq/kg sec en aval), à des niveaux sensiblement identiques à ceux mesurés dans le Rhône, hors influence des rejets des installations nucléaires. Sa présence dans l'Isère en aval des centres de recherche de Grenoble est donc principalement liée aux retombées atmosphériques passées (accident de Tchernobyl et tirs aériens d'armes nucléaires).

Le césium dans le milieu littoral et marin

En milieu marin, le césium 137 est essentiellement composé d'éléments solubles et présente des capacités de fixation assez faibles, variables selon les végétaux et les animaux, avec des facteurs de concentration (Bq/kg frais par Bq/L d'eau) de l'ordre de 50 pour les algues et de 10 à 400 pour les animaux. Les niveaux hors influence sont de l'ordre de 0,1 à 2 Bq/m³ dans l'eau de mer, 0,1 à 2 Bq/kg sec dans les algues et les moules et de 0,1 à 6 Bq/kg sec dans les poissons. Dans les sédiments, les activités vont de 0,1 à 15 Bq/kg sec.

La présence des isotopes radioactifs du césium dans le milieu marin est liée aux activités humaines. Ces sources peuvent être classées en trois catégories :

- les rejets liquides en mer ou en rivière des installations nucléaires ;
- les dépôts sur la surface des mers et des océans des aérosols atmosphériques, dont ceux émis par les installations nucléaires en fonctionnement normal ou à la suite de rejets accidentels ;
- les décharges de déchets radioactifs effectués sur des fonds abyssaux et sur des plateaux continentaux de faible profondeur.

■ **Tableau II.8** - Activités moyennes pondérées du césium 137 dans les sédiments prélevés dans les eaux de surface autour du site de La Hague entre janvier 2010 et décembre 2012 (Bq/kg sec).

Commune	Rivière	Résultats	
		janv. 2010 – juin 2011 (Bq/kg sec)	juillet 2011 – déc. 2012 (Bq/kg sec)
Digulleville	Ruisseau de la Sainte-Hélène (hameau de La Fosse)	$13,9 \pm 0,9$	$11,4 \pm 1,2$
Jobourg	Ruisseau des Moulins	$50,4 \pm 1,8$	55 ± 5
Omonville-la-Petite	Ruisseau des Landes	$6,9 \pm 0,5$	$2,54 \pm 0,45$

Eau de mer

Du fait de sa désintégration assez rapide, de l'arrêt des essais nucléaires militaires et de la dilution très importante apportée par le milieu marin, la détection du césium 137 dans l'eau de mer est très difficile. Ainsi, l'IRSN a mis en œuvre un protocole pour abaisser les limites de détection des radionucléides dans l'eau de mer (césiums 134 et 137) par une méthode de concentration.

Le principe de cette méthode est basé sur la concentration de certains radionucléides émetteurs gamma présents dans 120 litres d'eau de mer, par coprecipitation du dioxyde de manganèse (MnO₂) et du ferrocyanure double de cobalt et de potassium (appelé plus couramment KCFC), afin de mesurer leur activité par spectrométrie gamma. Les principaux radionucléides artificiels pouvant être analysés sont : manganèse 54, cobalt 57, cobalt 58, cobalt 60, zinc 65, rhodium 106, argent 110m, antimoine 124, antimoine 125, césium 134 et césium 137. Ces radionucléides seront fixés au précipité.

Malgré l'utilisation de cette technique, le césium 134 n'a pas été détecté dans l'eau de mer en 2011 et 2012. Les niveaux de césium 137 résiduels sont encore mesurables dans les eaux marines mais uniquement à très bas niveau. L'activité volumique du césium 137 dans ces eaux est de l'ordre de quelques mBq/L (tableau II.9).

Les résultats obtenus au niveau des stations de Wimereux, Roscoff, Concarneau, Pornichet et Oléron sont habituellement légèrement inférieurs à ceux de la station de Goury sous influence directe des rejets de l'usine de retraitement de combustible usé de La Hague. Cependant, corrélativement à la baisse des rejets de l'usine La Hague, l'activité du césium 137 dans les eaux côtières influencées par ces rejets a fortement diminué au cours des dernières décennies. Elle variait de 30 à 50 mBq/L durant les années 1980 contre 1 à 2 mBq/L aujourd'hui.

Les autres résultats de mesures réalisées sur des prélèvements d'eau de mer effectués à Gravelines, Cherbourg, Flamanville, Penly, Paluel, Brest, Arcachon et Toulon sont inférieurs à la limite de détection habituelle (hors mise en œuvre de la méthode de concentration des 120 litres d'eau de mer) de 0,02 Bq/L.

Matières en suspension

En complément des analyses réalisées sur la fraction liquide, des mesures de spectrométrie gamma sont effectuées sur les matières en suspension (MES) sur lesquelles s'adsorbent de nombreux radionucléides dont les césiums.

Les CNPE de Flamanville, Paluel, Penly et Gravelines sont refroidis par l'eau de la Manche ou de la mer du Nord. Afin d'améliorer la dilution des rejets d'effluents liquides en mer, ces CNPE effectuent leurs rejets en pleine mer, via une conduite sous-marine. Ces émissaires conduisent à une dilution dans le milieu marin mais ne permettent pas la mise en œuvre d'un équipement de prélèvement en continu. Afin de pallier cette difficulté technique, des hydrocollecteurs sont implantés au sein de l'ouvrage de rejet (bassin ou puits de rejet), en amont des rejets en mer.

Dans tous les cas, les activités mesurées au niveau de ces hydrocollecteurs informent sur l'activité moyenne mensuelle rejetée par le CNPE et ajoutée au milieu marin. En ce qui concerne le CNPE de Gravelines, la conception de l'ouvrage de rejet est différente. Les rejets sont effectués dans un canal marin qui débouche ensuite sur le littoral, constituant de ce fait un milieu récepteur intermédiaire avant dilution en mer. Un hydrocollecteur est implanté au niveau de ce canal.

Station de prélèvement	Activité moyenne pondérée du césium 137 (Bq/L)
Wimereux	0,00166 ± 0,00045
Port de Goury	0,00178 ± 0,00006
Roscoff	0,00136 ± 0,00012
Concarneau	0,00118 ± 0,00012
Pornichet	0,0016 ± 0,00048
Oléron	0,00123 ± 0,00041

■ **Tableau II.9** - Activités moyennes pondérées du césium 137 dans les eaux de mer (échantillons de 120 litres) prélevés entre juillet 2011 et décembre 2012 et traités par la méthode de concentration (Bq/L).

■ **Tableau II.10** - Activités moyennes pondérées du césium 137 dans les sédiments prélevés entre juillet 2011 et décembre 2012 sur le littoral français (Bq/kg sec).

Station de prélèvement (du littoral nord vers le sud)	Activité moyenne pondérée en césium 137 (Bq/kg sec)
Dunkerque	0,134 ± 0,03
Mers-les-Bains	0,133 ± 0,02
Honfleur	0,97 ± 0,06
Barfleur	0,45 ± 0,09
Fermanville	0,6 ± 0,16
Cherbourg	0,402 ± 0,047
Jobourg	0,36 ± 0,05
Herqueville	0,7 ± 0,16
Les Pieux	0,55 ± 0,06
Sciotot	0,46 ± 0,09
Brest	0,99 ± 0,18
Crozon	1,11 ± 0,12
Pornichet	0,118 ± 0,034
Saint-Pierre-d'Oléron	0,12 ± 0,029
Arcachon	0,13 ± 0,07
Toulon	0,34 ± 0,046

Un marquage résiduel en césium 137 est observé sur les MES au niveau de ces stations (activités moyennes pondérées comprises entre 1,53 et 3,11 Bq/kg sec). Ces activités ne mettent pas en évidence de pic d'activité lié à une anomalie de rejet d'effluents liquides des CNPE marins. Elles sont par ailleurs comparables avec celles enregistrées les années antérieures et plus globalement avec le bruit de fond en césium 137 mesuré sur l'ensemble du littoral.

Sédiments

Les concentrations en césium 137 mesurées dans les prélèvements réalisés en 2011 et 2012 sont faibles (au maximum $1,92 \pm 0,43$ Bq/kg sec à Crozon), voire inférieures aux limites de détection (Sciotot, Arcachon). Les variabilités observées (tableau II.10), du même ordre de grandeur que celles mesurées ces dernières années, ne permettent pas de mettre en évidence une influence des rejets actuels des installations. Elles sont principalement conditionnées par la nature des sédiments prélevés présentant des capacités différentes de fixation des radionucléides (en particulier en fonction de leur granulométrie).

La présence de césium 137 dans les sédiments (figure II.46), en Manche – mer du Nord, est principalement liée aux rejets d'effluents liquides passés et présents des installations du site de La Hague auxquels viennent s'ajouter les rejets liquides du site de Sellafield en Angleterre et la rémanence des retombées anciennes (essais atmosphériques et Tchernobyl notamment).

Flore et faune aquatiques

La capacité de dilution du milieu marin étant beaucoup plus importante que celle du milieu aquatique continental, la

surveillance du littoral est orientée davantage vers des bio-indicateurs (algues, mollusques, crustacés, poissons), qui concentrent les polluants. Les fluctuations des résultats de mesure pour les radionucléides artificiels comme les radiocésiums peuvent cependant être importantes pour une même station de prélèvement et pour un organisme vivant donné. Ces fluctuations peuvent être liées à des évolutions intrinsèques à la matière vivante, à la variabilité due au prélèvement lui-même, ainsi qu'aux variations des rejets liquides des installations nucléaires dans le milieu marin.

Algues et posidonies

Les végétaux aquatiques ont une grande capacité à fixer certains radionucléides. Au-delà du fait que les algues marines entrent dans la composition de produits consommés par l'homme (alginates) ou peuvent être utilisées comme amendement, ces organismes intègrent et concentrent les variations de la teneur en radionucléides de l'eau et représentent donc un indicateur biologique sensible de l'évolution de la concentration des substances radioactives présentes dans l'eau de mer.

Une surveillance régulière de la radioactivité présente dans les végétaux aquatiques (algues, posidonies) est effectuée par l'intermédiaire de différentes stations situées sur l'ensemble du littoral (mer du Nord, Manche, Atlantique et Méditerranée).

Comme pour les autres matrices marines, les mesures de césium 134 par spectrométrie gamma sont toutes restées inférieures aux limites de détection des appareils utilisés.

Le césium 137 présent à l'état de traces dans les algues des côtes françaises s'explique aujourd'hui avant tout par les retombées des essais atmosphériques nucléaires. Les rejets



Figure II.46 - Prélèvement de sédiments marins (sables) effectué à l'Anse du Brick (Fermanville).

en césium des installations nucléaires ont diminué depuis plus de vingt ans au point qu'aujourd'hui, le marquage des algues par ce radionucléide est relativement peu différent entre Oléron, hors zone d'influence (valeur maximale mesurée : $0,32 \pm 0,1$ Bq/kg sec) et la station de Wimereux, située à proximité de La Hague (valeur maximale mesurée : $0,46 \pm 0,11$ Bq/kg sec).

Le césium 137 est mesuré dans la plupart des échantillons d'algues prélevés en 2011 et 2012. Les activités moyennes pour la façade Atlantique – Manche – mer du Nord oscillent entre $0,24 \pm 0,12$ et $0,4 \pm 0,11$ Bq/kg sec. Les valeurs les plus élevées sont mesurées au niveau des stations proches de l'émissaire de rejet de La Hague ($0,52 \pm 0,12$ Bq/kg sec à Barfleur) et pour lesquelles les maxima sont généralement observés. Ces faibles activités décroissent rapidement avec l'éloignement de l'émissaire de rejet pour atteindre des valeurs similaires voire inférieures à ce que l'on peut mesurer dans les fucus prélevés à Oléron, loin de toute installation nucléaire.

Les mesures de césium 137 effectuées en Méditerranée sur des prélèvements de posidonies en 2011 et 2012 sont restées inférieures aux limites de détection.

Mollusques, crustacés et poissons

La contamination des organismes supérieurs par les radiocésiums dans les écosystèmes aquatiques provient plus de l'ingestion de proies contaminées que de l'adsorption directe à partir de l'eau. Le niveau d'accumulation du césium varie en fonction de l'espèce et de la taille des organismes.

Sur la période d'analyse de ce bilan radiologique, des prélèvements de mollusques, de crustacés et de poissons ont été effectués sur l'ensemble du littoral français. Les résultats des analyses de césium 134 et 137 réalisées par spectrométrie

gamma en 2011 et 2012 sur les crustacés (araignée de mer, crevette, tourteau) entre Concarneau et Dunkerque sont restés proches ou inférieurs aux limites de détection (de l'ordre de 0,1 Bq/kg frais).

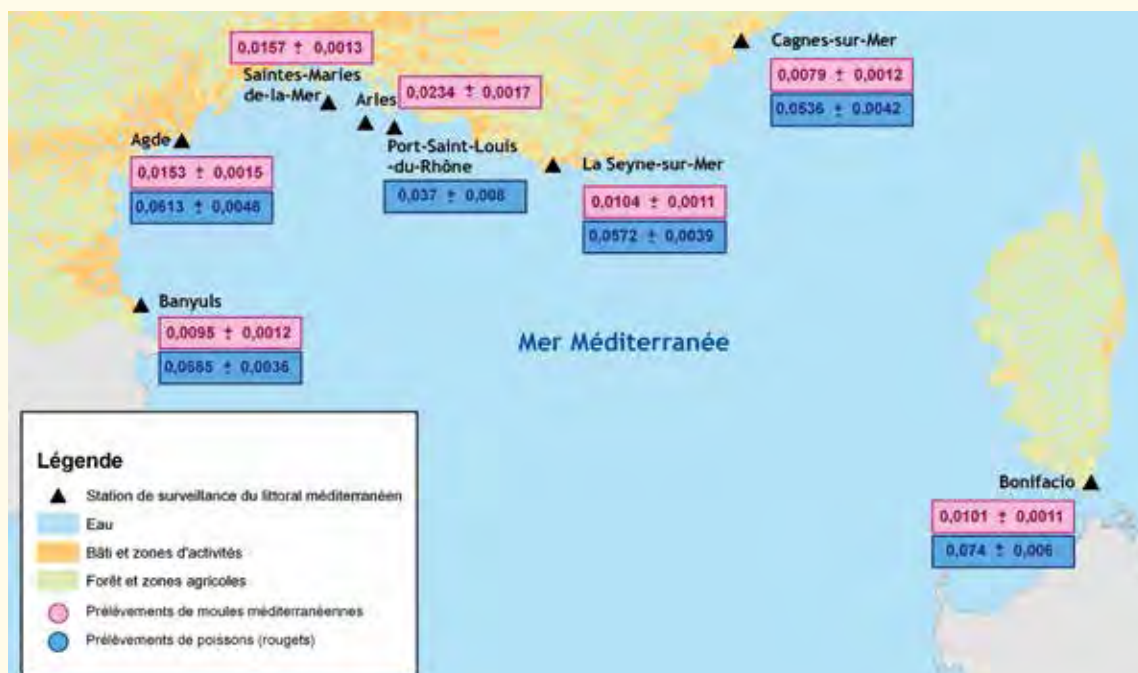
De la même façon, les mesures effectuées sur cette même période dans les prélèvements de mollusques (bulot, coquille Saint-Jacques, huître et moule) sur le littoral Atlantique, Manche et mer du Nord n'ont pas permis de déceler les césiums (valeurs inférieures aux limites de détection de 0,05 à 0,19 Bq/kg frais). Le suivi du milieu marin en Méditerranée française est mis en œuvre par l'IRSN à l'aide de prélèvements bimestriels de moules (sur huit stations) ainsi que de poissons (sur quatre stations). La répartition des stations permet une couverture géographique complète de la côte méditerranéenne française. Les moules ont été sélectionnées comme bioindicateur pour leur capacité à accumuler les contaminants présents dans les eaux côtières et les poissons pour leur niveau trophique plus élevé (permettant donc de mettre en évidence un éventuel phénomène de bioamplification).

Les résultats des mesures par spectrométrie gamma bas niveau (figure II.47) mettent en évidence les points suivants :

- les niveaux de radionucléides artificiels en zone côtière restent très faibles, souvent avec des activités proches des limites de détection des meilleures techniques analytiques ;
- seul le césium 137 est régulièrement détecté par spectrométrie gamma directe dans les échantillons avec des valeurs inférieures à 0,03 Bq/kg frais pour les moules et inférieures à 0,1 Bq/kg frais pour les poissons (rougets).

L'évolution des activités dans les moules sur les dernières années montre une stabilisation des niveaux, après une forte diminution au cours de la décennie 1990 (voir le Bilan de

Figure II.47 - Activités moyennes pondérées du césium 137 dans les moules et les rougets prélevés le long du littoral méditerranéen entre juillet 2011 et décembre 2012 (en Bq/kg frais).



l'état radiologique de l'environnement français en 2010-2011). Cette stabilisation traduit un équilibre entre les apports au milieu côtier, la bioaccumulation dans les organismes, et les processus sédimentaires (stockage, remobilisation partielle).

Chez les poissons, cette diminution est moins marquée. Les activités du césium 137 dans les poissons s'établissent désormais à des niveaux trois à quatre fois supérieurs à ceux mesurés dans les moules en raison de la position plus élevée dans la chaîne trophique des premiers et des phénomènes de rétention active du césium dans les muscles des poissons, comme analogue chimique du potassium. La stabilisation écologique de la répartition du césium 137 étant effective, l'évolution des activités dans les années à venir, sauf nouvel apport significatif, devrait refléter la décroissance radioactive de cet élément (demi-vie = 30 ans).

Sur la façade Atlantique, Manche et mer du Nord, des traces de césium 137 sont également mises en évidence sur la plupart des prélèvements de poissons (congre, lotte, plie, rousette), à de faibles activités comprises entre $0,032 \pm 0,016$ Bq/kg frais (Saint-Pierre-d'Oléron) et $0,197 \pm 0,029$ Bq/kg frais (Concarneau). Celles-ci sont relativement proches de ce qu'on peut observer sur le littoral atlantique.

Des prélèvements de poissons sont également réalisés dans le cadre de la surveillance radiologique outre-mer (tableau II.11). Le césium 137 est également systématiquement décelé dans ces prélèvements, à des niveaux comparables à ceux mesurés le long du littoral français. Les quelques variations observées sont notamment dues à une variabilité naturelle importante.

En résumé

Dans tous les compartiments, la faiblesse des rejets et l'omniprésence d'un bruit de fond rémanent font que les augmentations significativement mesurables des concentrations du césium 137, par rapport aux niveaux préexistants, ne sont que rarement mises en évidence dans le cas des rejets liquides (utilisation de bioindicateurs aquatiques et mise en œuvre de techniques métrologiques bas bruit de fond) et quasiment jamais en ce qui concerne les rejets atmosphériques.

■ **Tableau II.11** - Activité en césium 137 dans les poissons prélevés dans le cadre de la surveillance radiologique outre-mer (Bq/kg frais).

Département	Commune	Date de pêche	Espèce(s)	Activité en césium 137 (Bq/kg frais)
Guadeloupe	Les Abymes	23/10/2012	Poisson-chat	$0,092 \pm 0,028$
Martinique	Case Pilote	30/10/2012	Thon rouge	$0,189 \pm 0,034$
Guyane	Cayenne	30/11/2012	Acoupa rouge	$0,075 \pm 0,034$
Réunion	Sainte-Marie	21/09/2012	Espadon et thon jaune	$0,2 \pm 0,05$
Mayotte	Mamoudzou	22/11/2012	Marlin	$0,275 \pm 0,041$
Mayotte	Mamoudzou	13/11/2012	Marlin	$0,155 \pm 0,027$

II.6 LE STRONTIUM 90

Généralités

De période 29 ans, le strontium 90 présent dans l'environnement est en quasi-totalité d'origine artificielle. C'est l'un des principaux radionucléides issus des retombées des essais nucléaires atmosphériques. Il est présent dans les effluents liquides des usines de retraitement et potentiellement des centres d'études.

• Explosions nucléaires atmosphériques

De 1945 à 1980, les explosions nucléaires atmosphériques ont conduit à la dispersion de 622 PBq de strontium 90 dans l'atmosphère. L'activité totale déposée est estimée à 470 PBq pour l'hémisphère nord (soit une densité de dépôt surfacique de 3 440 Bq/m²) et à 142 PBq pour l'hémisphère sud.

• Installations de retraitement du combustible

Le strontium 90 est créé par fission au sein des réacteurs et l'essentiel de ses rejets s'effectue par voie liquide, lors du retraitement des combustibles irradiés. En 2012, les rejets des usines de La Hague et de Sellafield (Royaume-Uni) se sont élevés respectivement à 0,14 TBq et 1,2 TBq ; ceux du centre de Marcoule ont été de 0,025 TBq.

• Accidents d'installations nucléaires

En 1957, l'accident de Windscale (rebaptisé depuis Sellafield, Royaume-Uni) a libéré 74 GBq de strontium 90. Les rejets de routine et surtout l'accident de l'usine Mayak, près de Kychtym dans la région de Tcheliabinsk (Oural), ont dispersé 58 PBq de strontium 90, entraînant une contamination des sols du bassin de la rivière Techa allant de 3,7 à 74 MBq/m². Lors de l'accident de Tchernobyl en 1986, environ 8 000 TBq

de strontium 90 ont été rejetés dans l'atmosphère ; dans le voisinage du site, la densité de dépôt a été de l'ordre de 1 MBq/m² alors qu'en France, les retombées ont été de l'ordre de 1 à 600 Bq/m².

La mesure du strontium 90 peut être réalisée de plusieurs façons :

- soit à partir de son descendant à l'équilibre, l'yttrium 90 (⁹⁰Y), par précipitation de l'oxalate d'yttrium puis analyse sur compteur bêta (figure II.48) ;
- soit par mesure du strontium 90 après séparation sur résine spécifique puis comptage en scintillation liquide.

Le strontium 90 dans le compartiment terrestre

Le strontium 90 mesuré dans le compartiment terrestre provient essentiellement du reliquat des retombées des essais nucléaires atmosphériques et, dans une moindre mesure, de l'accident de Tchernobyl.

Dans les sols, les mesures effectuées par l'IRSN indiquent en général des activités massiques de l'ordre du becquerel par kilogramme de sol sec. L'existence de sols présentant une activité détectable en strontium 90 est par ailleurs probable, notamment sur les reliefs des Alpes et du Jura. En effet, des mesures effectuées sur des prairies d'altitude en Autriche ainsi qu'en Suisse indiquent des activités respectives de l'ordre de 0,3 à 10 Bq/kg de sol sec. Des mesures effectuées dans la province de Biscaye (Espagne) font état de valeurs allant d'environ 0,2 à 9 Bq/kg dans les sols.

2 - Valeur estimée à partir des mesures de densité de dépôt, compte tenu d'une masse de sol par unité de surface évaluée à 280 kg/m² (sol sec) sur les 20 premiers centimètres du sol.



Figure II.48 - Chargement d'un échantillon préparé dans un compteur proportionnel bêta.

Flore terrestre

Le strontium 90 est recherché sur les herbes prélevées semestriellement sous les vents dominants principaux et secondaires du site de Marcoule. Les niveaux restent très faibles (de l'ordre de $0,505 \pm 0,045$ Bq/kg de matière sèche en moyenne) et ne permettent pas de noter une différence significative selon la station de prélèvement : ils témoignent de la rémanence due principalement aux tirs aériens d'armes nucléaires dans l'atmosphère. La figure II.49 illustre la décroissance des activités relevées dans les échantillons d'herbe prélevés sur l'ensemble du territoire français depuis 1987.

Productions agricoles et aliments

Lait

Bien que la radioactivité dans le lait soit aujourd'hui essentiellement d'origine naturelle (présence de potassium 40 notamment), le strontium 90 est régulièrement mesuré dans le lait français. Ainsi, des traces de strontium 90, comprises entre $0,009 \pm 0,013$ et $0,132 \pm 0,015$ Bq/L, sont encore observées en 2012 dans la plupart des échantillons analysés sur l'ensemble de la période de collecte considérée (moyenne pondérée de $0,0298 \pm 0,0015$ Bq/L). La présence de ce radionucléide constitue une rémanence des retombées des tirs atmosphériques d'armes nucléaires. Aucune augmentation de son activité n'est décelée dans le lait prélevé dans les fermes situées à proximité des installations nucléaires comme en témoigne la figure II.50 (page 76).

Viande d'élevage et gibier

En 2011 et 2012, le strontium a été recherché dans la viande d'animaux d'élevage (boeuf élevé à proximité du site de La Hague) et de gibiers (sangliers chassés à proximité des sites de Marcoule, Civaux, Chooz). Les résultats d'analyses sont restés

inférieurs aux limites de détection pour l'ensemble de ces échantillons ($< 0,009$ Bq/kg frais en moyenne).

Céréales

En 2011, la surveillance radiologique du blé en métropole était assurée grâce à la contribution de France Agrimer qui a prélevé des échantillons provenant de 210 silos répartis sur l'ensemble du territoire (dont 30 proches des installations nucléaires). En 2012, la surveillance a porté sur l'analyse de productions céréalières (blé, maïs) provenant de 31 exploitations céréalières situées à proximité des sites nucléaires. De même que les années antérieures, le seul radionucléide artificiel décelé dans le blé est le strontium 90. La figure II.51 (page 76) illustre la diminution de l'activité de ce radionucléide dans les céréales de 1969 à aujourd'hui, toutes régions confondues.

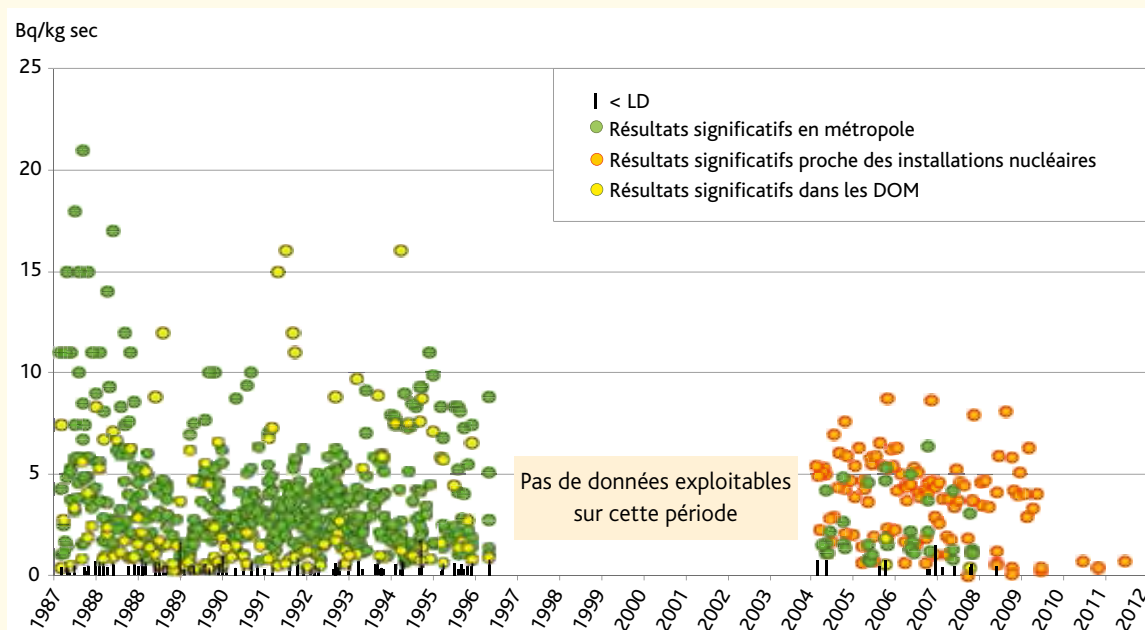
Fruits, légumes, champignons

Des traces de strontium 90 ont été mesurées dans certains fruits, légumes et champignons prélevés sur le territoire français métropolitain (sous et hors influence potentielle des rejets des installations nucléaires). Non mesuré en routine dans les territoires d'outre-mer, cet élément n'a pas été détecté dans les fruits récoltés sur l'Île de La Réunion dans le cadre d'une étude ponctuelle. L'ensemble des résultats d'analyses sont présentés dans le tableau II.12 (page 77).

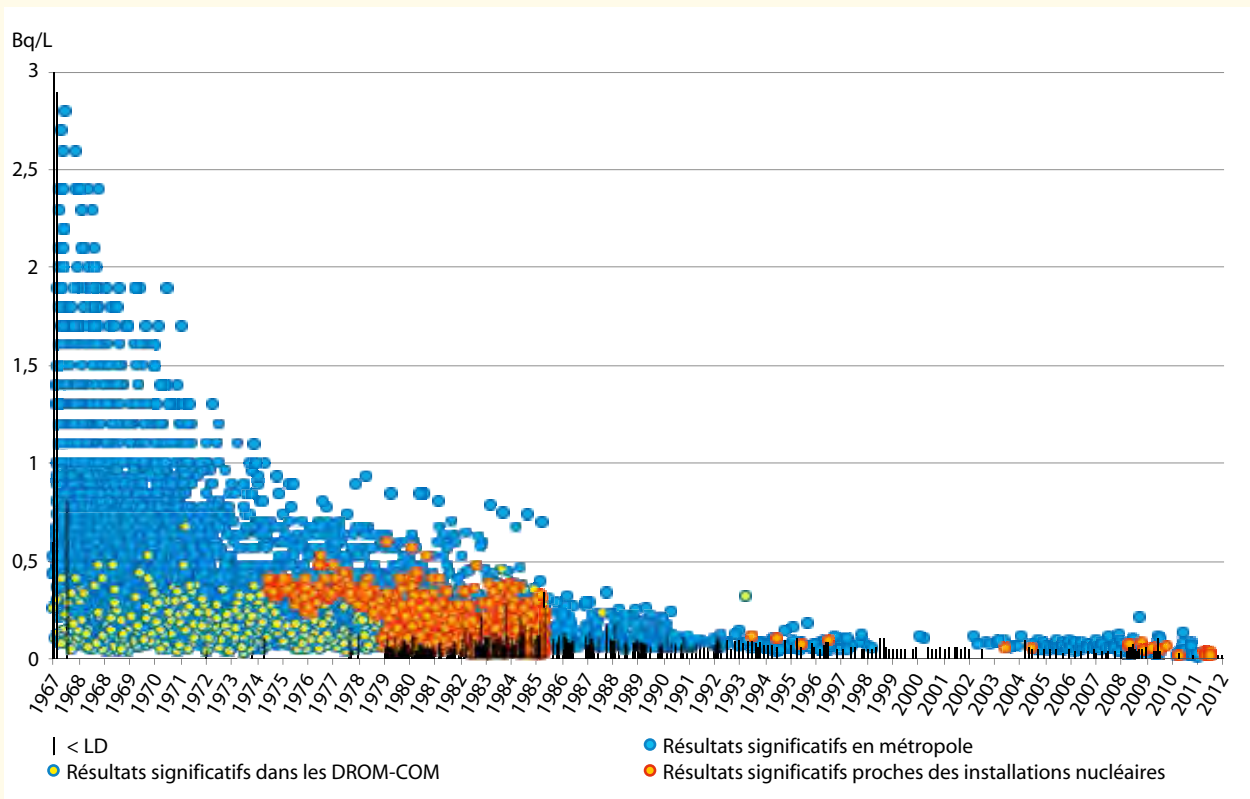
Le strontium 90 dans le compartiment aquatique continental

Le strontium 90 est introduit dans les fleuves et les rivières français via les eaux de drainage des sols marqués par les retombées atmosphériques globales, et dans le Rhône également par les effluents liquides du centre de retraitement de Marcoule. Les concentrations du strontium 90 en rivière sont généralement inférieures à 10 mBq/L.

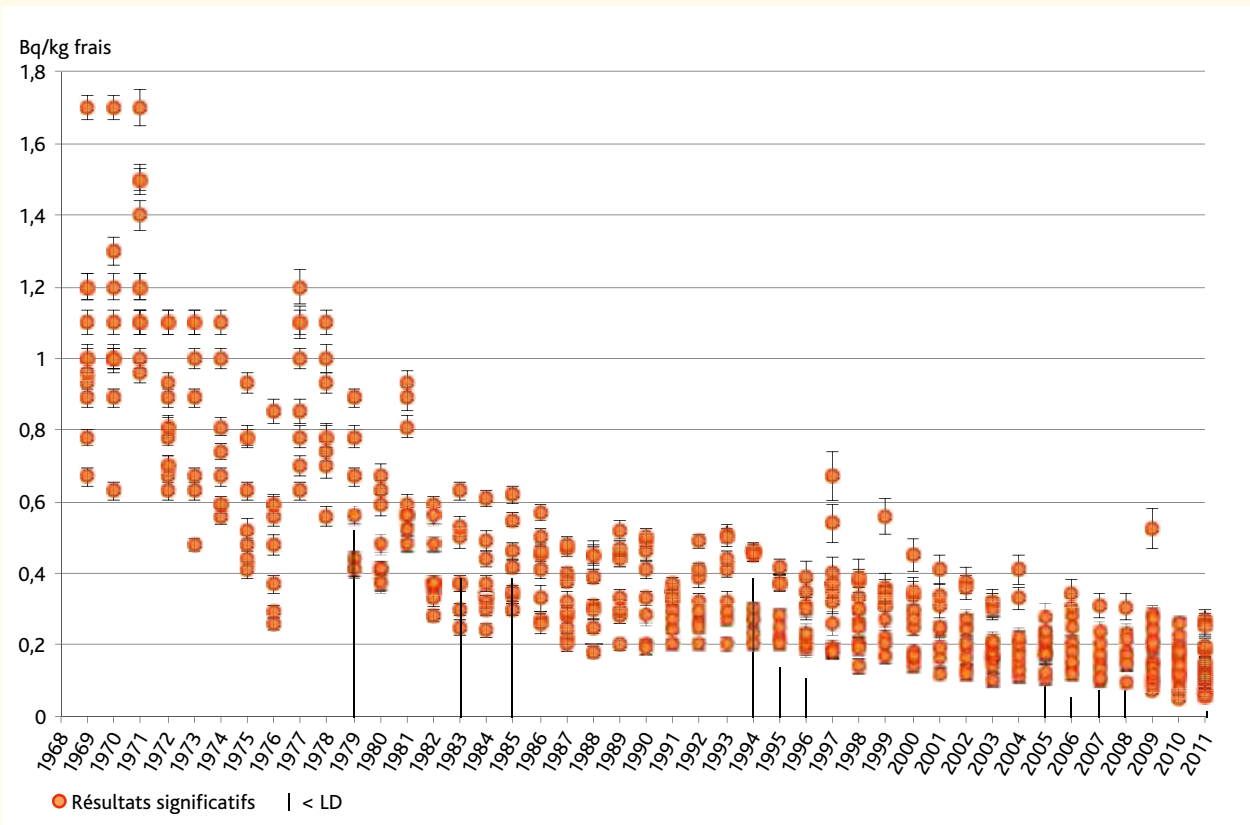
■ Figure II.49 - Activités en strontium 90 mesurées sur les échantillons d'herbe prélevés en métropole et en outre-mer de 1987 à 2012, toutes régions confondues (Bq/kg sec).



■ **Figure II.50** - Activités en strontium 90 mesurées sur les échantillons de lait prélevés en métropole et en outre-mer de 1967 à 2012, toutes régions confondues (Bq/L).



■ **Figure II.51** - Activités en strontium 90 mesurées sur les échantillons de blé de 1969 à 2011, toutes régions confondues (Bq/kg frais).



Eaux continentales

Eau de surface

Le strontium 90 est régulièrement mesuré dans les eaux de surfaces métropolitaines, toutes régions confondues, à des activités proches des limites de détection (figure II.52). Ces activités sont globalement à mettre en relation avec les retombées atmosphériques des tirs d'armes nucléaires militaires.

Seul le ruisseau des Landes, qui s'écoule au nord-ouest du site de La Hague, présente des activités 10 à 100 fois supérieures au bruit de fond national induit par les retombées anciennes. Depuis 1996, l'IRSN réalise des prélèvements d'eau de surface de ce ruisseau. Ce dernier présente une contamination en strontium 90, dont les niveaux d'activités sont à mettre en relation avec la contamination en strontium 90 de la nappe phréatique par des

déchets mal confinés, entreposés en surface sur le site d'Areva La Hague dans les années 1980. On notera tout de même la décroissance observée des activités relevées : en 1996, elles avoisinaient les 3 Bq/L, elles ne sont plus que de $0,027 \pm 0,01$ Bq/L en moyenne sur la période 2011-2012.

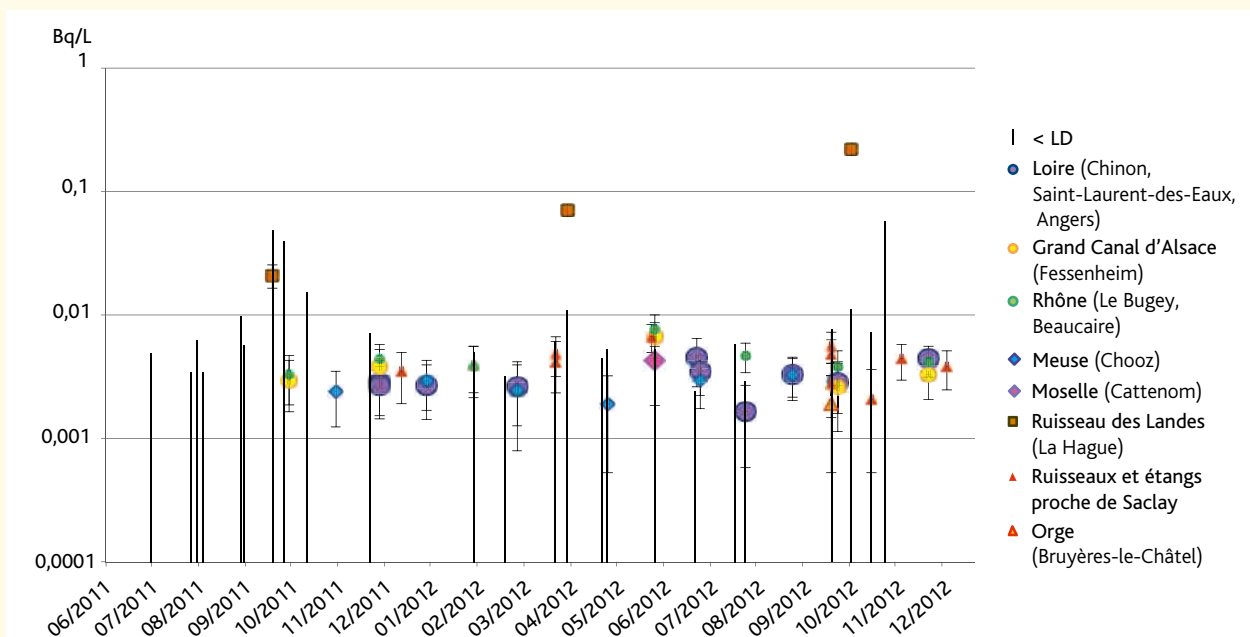
Eau de nappe

Un prélèvement bimestriel d'eau de nappe est réalisé sur la commune de Codolet, en aval hydrogéologique du site de Marcoule. Le strontium y est régulièrement mesuré à une activité moyenne de $0,0025 \pm 0,0005$ Bq/L (11 mesures significatives sur 13 analyses réalisées entre juillet 2011 et décembre 2012). La teneur en strontium de l'eau de cette nappe est ainsi environ deux fois moins importante que celle mesurée dans l'eau du Rhône liée aux retombées anciennes.

Tableau II.12 - Résultats des mesures de strontium 90 dans les fruits, légumes et champignons prélevés en 2011 et 2012 (Bq/kg frais).

Espèce prélevée	Date de prélèvement	Site nucléaire à proximité	Commune sur laquelle se trouve le prélèvement (département)	Valeur de la mesure (Bq/kg frais)
Champignons sauvages	02/11/2011	CNPE Civaux	Gouex (86)	$0,063 \pm 0,013$
Champignons sauvages	02/11/2011	CNPE Civaux	Gouex (86)	$0,204 \pm 0,024$
Champignons sauvages	08/08/2011	CNPE Golfech	Saint-Loup (82)	$0,024 \pm 0,034$
Asperges	26/04/2011	CNPE Blayais	Étauliers (33)	< 0,02
Asperges	03/05/2011	CNPE Blayais	Étauliers (33)	$0,0134 \pm 0,0028$
Salades	21/06/2011	CEA Marcoule	Sabran (30)	$0,076 \pm 0,015$
Asperges	03/05/2012	CEA Marcoule	Pont-Saint-Esprit (30)	< 0,018
Pommes de table	13/10/2011	CEA Marcoule	Pont-Saint-Esprit (30)	$0,0098 \pm 0,0021$
Mangues	06/01/2011	Sans objet	Saint-Louis (974)	< 0,008
Ananas	06/01/2011	Sans objet	Saint-Louis (974)	< 0,0042
Litchis	06/01/2011	Sans objet	Saint-Benoit (974)	< 0,018

Figure II.52 - Activités en strontium 90 mesurées dans les eaux des principaux fleuves et rivières français entre juillet 2011 et décembre 2012 (Bq/L).



Matières en suspension et sédiments

Les résultats des analyses effectuées en 2011 et 2012 sur les matières en suspension (MES) et les sédiments du milieu dulçaquicole sont présentés dans le tableau II.13 et la figure II.53.

Matières en suspension (MES)

Les mesures réalisées sur les matières en suspension prélevées en aval proche ou lointain de certains centres nucléaires de production d'électricité témoignent des niveaux moyens observés dans les cours d'eau français en raison de la rémanence due aux retombées anciennes puisque cet élément n'est pas rejeté par ces installations en fonctionnement normal.

Sédiments

Les analyses effectuées sur les sédiments prélevés au niveau de l'aqueduc des Mineurs, via lequel transitent les rejets d'effluents liquides autorisés du CEA Saclay, ne permettent pas de distinguer la part attribuable aux rejets de ce site de celle due aux retombées anciennes. Les activités relevées sont du même ordre de grandeur que les niveaux habituellement observés dans les cours d'eau français, en raison des retombées anciennes (activité moyenne de $1,74 \pm 0,16$ Bq/kg sec mesurée sur les sédiments prélevés à l'aqueduc des Mineurs). Des mesures effectuées entre 2009 et 2011 dans l'Adour, la Garonne et la Vienne indiquent que le strontium est encore mesurable dans les cours d'eau hors influence potentielle des rejets des installations nucléaires à des activités comprises entre $0,28 \pm 0,14$ Bq/kg sec (dans l'Adour) et $1,84 \pm 0,26$ Bq/kg sec (relevés dans la Vienne).

La configuration générale du relief du Cotentin et l'étroitesse de la presqu'île ne laissent place qu'à de petites rivières côtières qui se jettent toutes dans la Manche. Il est ainsi possible de citer les ruisseaux de la Sainte-Hélène,

des Landes et des Moulinets qui sont sous influence du site de La Hague. Ils constituent des sites de référence historique du marquage radiologique anthropique. L'analyse portant sur les cours d'eau à proximité du site de La Hague révèle des niveaux en strontium 90 légèrement supérieurs à ceux rencontrés dans la plupart des cours d'eau français imputables aux rejets atmosphériques passés de ces installations (activité maximale de $11,5 \pm 1,5$ Bq/kg sec mesuré sur l'échantillon prélevé en avril 2012 dans le bassin de rétention des Moulinets).

Un marquage rémanent en strontium 90 est observé sur les sédiments et les matières en suspension prélevés en aval du centre de retraitement de Marcoule en raison des rejets passés et actuels de ce site. Les activités observées restent toutefois assez faibles et tendent aujourd'hui vers les niveaux maximaux relevés dans les cours d'eau français situés hors influence potentielle des rejets d'installations nucléaires (activité maximale de $3,81 \pm 0,43$ Bq/kg sec relevée à Roquemaure en aval de Marcoule). Dans les années 1990, les activités massiques en strontium 90 observées en aval de Marcoule étaient en moyenne supérieures de un à deux ordres de grandeur aux activités mesurées dans les sédiments des cours d'eau français.

Flore aquatique continentale

Sur la période 2011-2012, des prélèvements semestriels de phanérogames aquatiques ont été réalisés en amont et en aval hydraulique du centre de retraitement de Marcoule. Les résultats entre l'amont ($1,36 \pm 0,14$ Bq/kg de matière sèche en moyenne) et l'aval ($1,52 \pm 0,16$ Bq/kg de matière sèche en moyenne) ne sont pas significativement différents et ne permettent pas de déterminer un marquage en strontium 90 dû aux rejets liquides de cette installation.

■ **Tableau II.13** - Activités moyennes mesurées en strontium 90 dans les sédiments du milieu dulçaquicole et les matières en suspension (MES) prélevés dans certains cours d'eau français (Bq/kg de matière sèche).

Matrice analysée	Site nucléaire à proximité	Milieu surveillé	Activité (Bq/kg sec)
Matières en suspension	CNPE de Cattenom	Moselle	$1,13 \pm 0,44$
	CNPE du Blayais	Gironde	$0,2 \pm 0,12$
	CNPE de Fessenheim	Grand canal d'Alsace	< 0,6
	/	Loire (au niveau des Ponts-de-Cé, en aval hydraulique des installations nucléaires implantées sur les berges de la Loire)	$0,83 \pm 0,13$
Sédiments	CEA Saclay	Aqueduc des Mineurs	$1,74 \pm 0,16$
	Site de La Hague	Ruisseau des Landes	$4,6 \pm 0,6$
		Bassin des Moulinets	$7,9 \pm 0,6$
		Ruisseau Sainte-Hélène	$2,16 \pm 0,41$

Le strontium 90 dans le compartiment aquatique marin

Matières en suspension et sédiments

Quelques mesures de strontium 90 ont été effectuées sur des matières en suspension prélevées en aval des CNPE marins et sur des sédiments marins prélevés le long du littoral Atlantique, Manche et mer du Nord (de Brest à Dunkerque). Les valeurs significatives relevées, proches des limites de détection, restent concentrées dans une région proche de l'émissaire de rejets liquides de l'usine de retraitement de combustible irradié de La Hague (tableau II.14).

Flore aquatique marine

Le strontium 90 est détecté ponctuellement, et à des activités faibles, dans les algues prélevées chaque semestre ou chaque trimestre dans les treize stations de surveillance réparties sur le littoral Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord : $0,12 \pm 0,27$ Bq/kg sec mesuré sur du fucus prélevé le 17 mai 2011 à Saint-Georges-de-la-Rivière (50) ; $0,74 \pm 0,17$ Bq/kg sec mesuré sur du fucus vésiculeux prélevé

le 27 juin 2011 à Dunkerque (59). Ce radionucléide a pour origine les rejets des installations de retraitement du combustible usé de La Hague et de Sellafield en Angleterre.

Faune aquatique marine

Les analyses effectuées en 2012 sur des poissons pêchés près du port militaire de Cherbourg et de l'usine de retraitement d'Areva La Hague n'ont pas permis de révéler la présence du strontium 90 dans ces denrées.

En résumé

Le strontium 90 n'étant pas rejeté en fonctionnement normal par les CNPE, les niveaux d'activité généralement observés reflètent la rémanence des dépôts anciens des essais atmosphériques et sont donc en diminution dans l'ensemble des compartiments examinés. Quelques échantillons prélevés dans l'environnement proche des installations de La Hague et de Marcoule présentent toutefois des activités supérieures au bruit de fond national et témoignent de rejets présents ou anciens de ces installations.

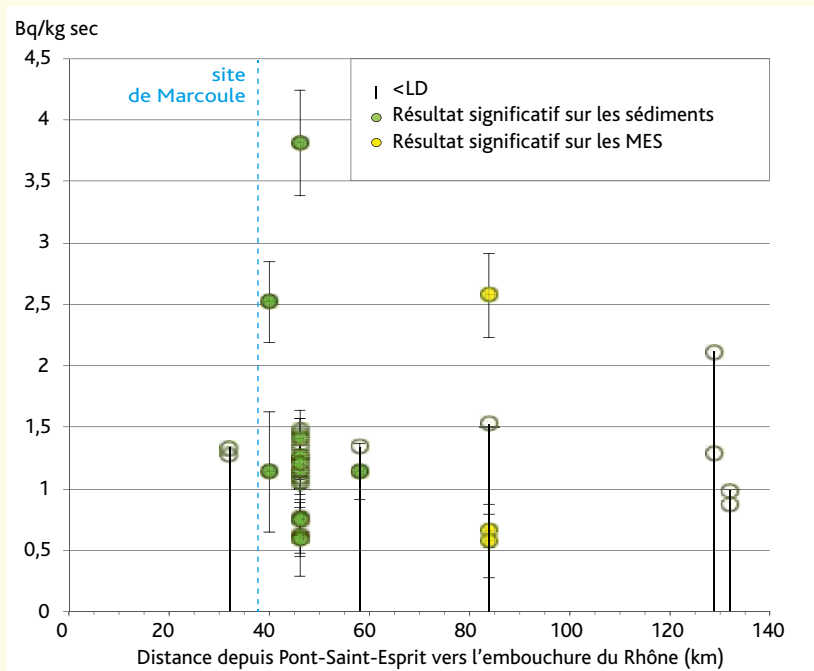


Figure II.53 - Activités massiques observées en strontium 90 en 2011 et 2012 sur les matières en suspension et les sédiments prélevés dans le Rhône, en aval de Pont-Saint-Esprit (30) (Bq/kg sec).

Commune de prélèvement	Activité massique moyenne en ⁹⁰ Sr (Bq/kg sec)	Activité maximale observée en ⁹⁰ Sr (Bq/kg sec)
Sciotot	$0,288 \pm 0,048$	$0,7 \pm 0,14$
Tréauville	$< 0,171$	/
Herqueville	$0,16 \pm 0,06$	$0,84 \pm 0,48$
Jobourg	$< 0,91$	/
Fermanville	$0,51 \pm 0,12$	$0,52 \pm 0,14$
Barfleur	$0,24 \pm 0,06$	$0,53 \pm 0,17$

Tableau II.14 - Activités en strontium 90 mesurées sur les sédiments marins prélevés près du site d'Areva La Hague (Bq/kg sec).

II.7 L'IODE 131

Généralités

L'iode fait partie de la famille chimique des halogènes. Très mobile dans l'environnement, il est présent à peu près partout mais de façon hétérogène. L'iode présente la particularité d'être rapidement assimilé par le corps humain, par ingestion ou inhalation. C'est un élément indispensable au fonctionnement hormonal impliquant la thyroïde, organe dans lequel il tend à se concentrer préférentiellement.

L'iode possède 25 isotopes dont la masse atomique varie de 117 à 141. Parmi eux, seul l'isotope 127 est stable. Parmi les autres isotopes, tous radioactifs, 13 sont produits par des réactions de fission dans les réacteurs nucléaires. La plupart ont une période radioactive très courte, de quelques secondes à quelques heures. Deux isotopes présentent une période plus longue : l'iode 131 (8,02 jours) et l'iode 129 (15,7 millions d'années). Ce dernier est 10^8 fois moins abondant que l'iode 131 dans un réacteur.

L'iode 131 est un émetteur β et γ et donne naissance au xénon 131 (isotope stable). La détermination de l'activité des produits de fission tels que l'iode 131 est réalisée par spectrométrie gamma. L'iode 129 est traitée dans le chapitre II.8 - *Les autres produits de fission et d'activation*.

L'iode 131 dans les rejets des installations nucléaires

Le cœur d'un réacteur en fonctionnement enferme une très grande quantité d'iode 131. Pour un réacteur à eau sous pression (REP) de 1 300 MWe, l'activité en iode 131 présente dans le combustible usé après un séjour d'environ 40 mois dans le cœur est de l'ordre de 4.10^{18} Bq. Compte tenu du temps passé entre le déchargement du combustible et son retraitement (plusieurs années), l'iode 131 est éliminé par simple décroissance radioactive.

Au cours du fonctionnement normal d'un réacteur et au cours des opérations de retraitement du combustible, une très faible fraction des éléments radioactifs présents se retrouve dans les effluents rejetés de façon contrôlée dans l'environnement. Compte tenu du confinement des circuits nucléaires et de l'efficacité des systèmes de piégeage en cas de fuite, les rejets d'iodes (iode 131 et iode 133) dans les effluents gazeux des CNPE sont globalement inférieurs à 0,1 GBq/an par réacteur. Les rejets d'iode 131 dans les effluents liquides sont de l'ordre de 0,01 GBq/an par réacteur.

Les principales formes d'iode radioactif présentes dans les rejets d'effluents radioactifs provenant des réacteurs nucléaires sont :

- **l'iode moléculaire** (I_2) présent sous forme gazeuse ;
- **l'iode organique**, dont une forme courante est l'iodure de méthyle (ICH_3), présent sous forme gazeuse ;

- **l'iode particulaire** (aérosols) dont le diamètre des particules est variable (avec possibilité d'agrégation).

Pour l'usine de traitement de combustibles usés de La Hague, l'activité des iodes rejetés annuellement dans les effluents était de l'ordre de $1,3.10^{12}$ Bq en 2012, dont 99 % dans les effluents liquides. Les rejets en iode 131 (et en iode 133) sont au moins 100 fois plus faibles que ceux en iode 129.

Utilisations industrielles et médicales

Plusieurs isotopes radioactifs de l'iode sont utilisés en médecine et en particulier l'iode 131 qui présente un grand intérêt pour l'exploration fonctionnelle de la thyroïde et le traitement de certains cancers thyroïdiens. L'iode est principalement utilisé sous forme de sources non scellées (NaI, CH_3I , molécules organiques marquées, etc.) pouvant être à l'origine d'une émission gazeuse sous forme I_2 .

Pour le traitement des hyperthyroïdies (400 à 700 MBq environ) et des cancers thyroïdiens (4 à 6 GBq environ), l'iode 131 est administré par voie orale principalement sous forme de gélules NaI. Il est désormais plus rarement utilisé pour les examens scintigraphiques (l'iode 123, émetteur gamma dont la période radioactive n'est que de 13,2 heures, est de plus en plus utilisé). L'utilisation de l'iode 131 entraîne des rejets à l'intérieur et à l'extérieur des hôpitaux du fait de sa manipulation, mais aussi du fait de l'excrétion (urines, fèces) par les patients eux-mêmes.

Dans l'industrie, l'iode 131 est utilisé pour tester l'efficacité des pièges à iode. L'activité mise en œuvre peut être de 10 à 150 MBq.

Les rejets passés en iode 131 issus des essais nucléaires atmosphériques et des principaux accidents graves

Pendant la période 1945-1962, les essais nucléaires atmosphériques ont libéré dans l'environnement une quantité d'iode 131 estimée à 6.10^{20} Bq. Au début des années 1960, les essais sont si fréquents qu'ils entretiennent une contamination prolongée de l'environnement par les radionucléides à vie courte, dont l'iode 131. Au cours des années 1970, les essais chinois, moins fréquents, conduisent à des pics sporadiques de radioactivité (exemple : essai chinois du 17 septembre 1976 – *figure II.54*). En raison de sa décroissance rapide, l'iode 131 déposé sur le sol de l'ensemble de la planète a rapidement disparu.

L'activité totale de l'iode 131 rejetée pendant l'accident de Tchernobyl (26 avril 1986) est estimée à $1.760.10^{15}$ Bq (représentant une masse d'iode 131 d'environ 380 g). L'iode 131 fut le principal radionucléide détecté en France durant les premiers jours de mai 1986. L'activité volumique moyenne de l'iode 131 dans l'air entre le 1^{er} et le 3 mai 1986

était comprise entre 0,02 Bq/m³ (Biarritz) et 4,2 Bq/m³ (Cadarache). À titre de comparaison, l'activité volumique de l'air à 1 kilomètre de la centrale nucléaire de Tchernobyl était de 10⁷ Bq/m³ durant cette même période (isotopes dominants : tellure 132 et iode 131).

En avril 2011, les stations grand débit et très grand débit de l'IRSN avaient permis d'identifier et de quantifier l'iode 131 suite à l'accident de Fukushima (voir le rapport IRSN : Analyse de l'impact de l'accident de Fukushima en France). Ce radionucléide a cependant rapidement disparu et n'était plus quantifiable de façon significative (valeur supérieure à la limite de détection des appareils de mesure) à la fin du mois d'avril 2011.

Processus de transfert des isotopes de l'iode dans l'environnement

Dans l'environnement, les isotopes de l'iode suivent les processus de transfert habituels : dispersion au sein du milieu récepteur, dépôt, captation par les organes aériens des végétaux, absorption racinaire, ingestion par l'animal.

Le comportement de l'iode dans l'environnement varie selon la forme physico-chimique sous laquelle il a été émis : les formes organiques se déposent plus lentement et sont moins bien retenues par la végétation que les formes moléculaires ; les formes particulaires ayant un comportement intermédiaire.

Du fait de sa période courte, l'iode 131 échappe à certaines voies de transfert lorsque celles-ci sont lentes (transfert aux végétaux par voie racinaire). Ingré par les animaux en période de lactation, l'iode se retrouve rapidement dans le lait (quelques heures après l'ingestion, le maximum apparaissant au bout de trois jours).

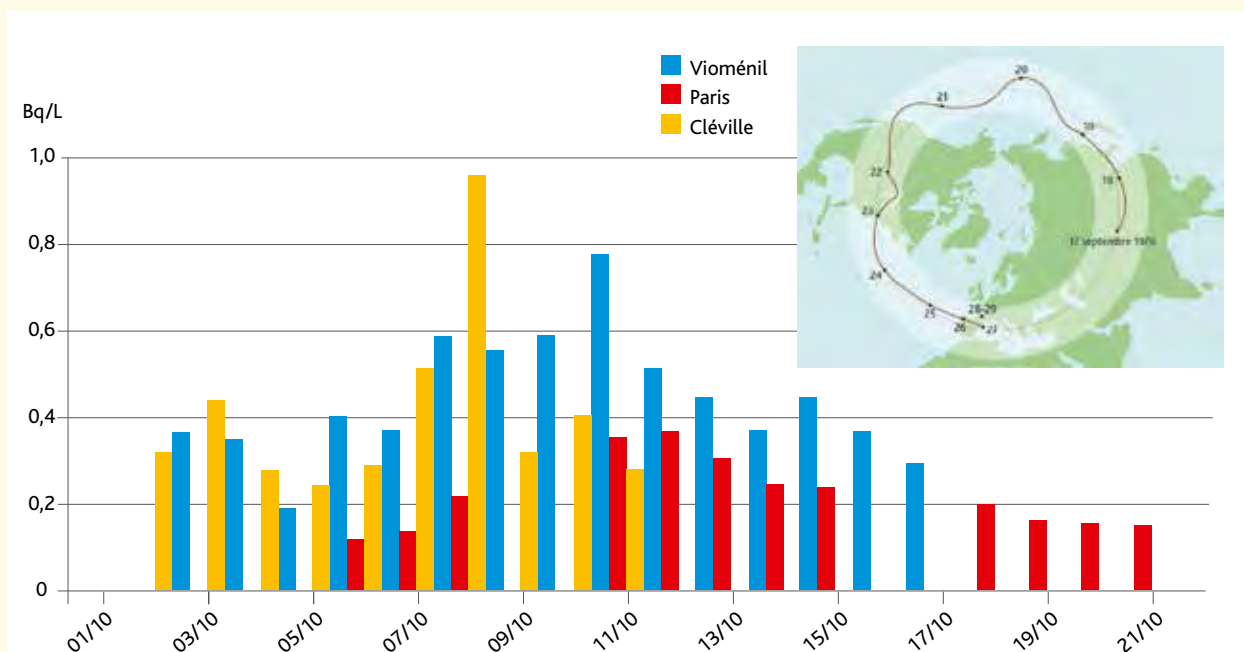
L'iode 131 dans le compartiment atmosphérique

En temps normal, l'iode 131 n'est pas détectable dans l'air. Seuls des rejets incidentels ou accidentels significatifs peuvent conduire à des concentrations mesurables, comme ce fut le cas après l'accident de Tchernobyl en 1986 ou de Fukushima en 2011.

En octobre 2011, des traces d'iode 131 ont cependant été détectées une nouvelle fois en France et dans d'autres pays d'Europe centrale et du nord, suite à un rejet provenant de l'Institut des isotopes de Budapest. Un second épisode de rejet de moindre ampleur s'est également produit depuis ce même institut hongrois entre début janvier et mi-février 2012 et a également conduit à la détection de traces d'iode sur la France quelques jours après le rejet (voir focus page 82).

En dehors de ces événements, l'iode 131 n'a pas été détecté sur les filtres aérosols issus des stations de prélèvements d'aérosols de l'IRSN.

■ Figure II.54 - Activité du lait en iode 131 en France en octobre 1976, consécutivement à l'essai chinois du 17 septembre 1976 (Bq/L).



Focus

Détection de traces d'iode 131 dans l'air en France entre octobre 2011 et février 2012

Dans le cadre de sa mission de surveillance de la radioactivité de l'atmosphère, l'IRSN a relevé la présence de traces d'iode 131 sous forme particulaire, sur plusieurs prélèvements d'air réalisés entre octobre 2011 et février 2012. La détection simultanée sur différentes stations à très grand débit du réseau Opera-Air de l'IRSN, et sur des réseaux analogues situés dans plusieurs pays scandinaves et d'Europe centrale, témoigne d'une dispersion à l'échelle internationale et vraisemblablement d'une seule et même origine. La présence d'iode 131 dans l'atmosphère est rare et ne peut témoigner que d'un événement récent au vu de la courte période radioactive de ce radionucléide, ce qui a conduit l'IRSN à en rechercher l'origine et les causes.

En aucun cas, les niveaux mesurés sur la fraction particulaire (de moins de un et jusqu'à une douzaine de microbecquerels³ par mètre cube d'air en France ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) n'ont présenté un risque sanitaire pour les populations. Seule la combinaison de prélèvements de très grands volumes⁴ et d'une métrologie dédiée à la quantification des traces a permis d'obtenir des valeurs significatives.

Les niveaux détectés sont restés plus de 100 fois inférieurs à ceux mesurés durant le passage sur la France des masses d'air contaminées par les rejets de la centrale de Fukushima, eux-mêmes sans conséquence sanitaire pour notre pays. Toutefois, l'impact à l'échelle locale et proche de la source pouvait ne pas être négligeable et il importait que l'IRSN puisse confirmer ou infirmer l'impact radiologique auprès des autorités françaises et à destination des ressortissants français basés à l'étranger.

3 - 1 millionième de becquerel par mètre cube d'air.

4 - 300 à 700 m³/h d'air filtré, sur des périodes de prélèvements de 5 à 10 jours soit entre 36 000 et 170 000 m³ d'air par échantillon.

L'iode est un élément très volatil et, de ce fait, est principalement rejeté sous forme gazeuse. Il se maintient majoritairement sous cette forme lorsqu'il se disperse dans l'environnement. Les traces qui ont été quantifiées ont toutes été obtenues sur des filtres permettant la collecte des particules. Parallèlement aux filtres à particules, l'IRSN a mis en place des prélèvements d'air sur des cartouches de charbon actif afin de rechercher la présence d'iode 131 gazeux. Toutefois, la limite de détection que permet d'atteindre cette technique de piégeage est de l'ordre de 250 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ alors qu'elle est environ 1 000 fois plus sensible pour la fraction particulaire du fait des débits importants admissibles sur des filtres à particules.

Au cours de la période pendant laquelle la valeur maximale en iode 131 particulaire a été relevée en France, aucune valeur significative en iode gazeux n'a pu être détectée.

Origine du rejet d'iode 131 détecté en octobre 2011

Les rejets d'iode radioactif en quantité significative peuvent résulter d'un incident ou d'un accident soit sur un réacteur nucléaire de production d'électricité ou de recherche soit sur une installation spécialisée dans la production ou l'utilisation d'iode 131. L'hypothèse d'un rejet depuis la centrale de Fukushima a rapidement été écartée compte tenu de l'absence de signalement par d'autres pays riverains ou plus proches du Japon. De plus, ce radionucléide aurait été accompagné d'autres produits de fission radioactifs, ce qui n'a pas été mis en évidence dans les analyses effectuées par l'IRSN. Suivant la seconde hypothèse, les recherches ont été orientées vers les différentes unités de production d'iode. La compilation des données signalées à l'échelle de l'Europe a montré que les concentrations étaient sensiblement plus élevées en Autriche et en République tchèque⁵ mais surtout en Hongrie.

5 - 65 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ dans l'est de l'Autriche, 27 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ en République tchèque, 16 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ en Slovaquie, 14 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ dans l'est de l'Allemagne, 13 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ en Pologne, 7 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ en Ukraine, 5 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ en Suède.

■ **Tableau II.15** - Activités volumiques significatives en iode 131 particulaire obtenues par l'IRSN sur des prélèvements d'aérosols provenant de stations à grand ou très grand débit d'aspiration du réseau Opera-Air ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

Lieu de prélèvement	Période de prélèvement		Activité volumique en iode 131 particulaire dans l'air ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) rapportée à la date du milieu de prélèvement
	Date de début	Date de fin	
Alençon (61)	05/11/2011	10/11/2011	3,8 ± 1,5
Bordeaux-Mérignac (33)	05/11/2011	10/11/2011	2,22 ± 0,29
Bure (55)	02/11/2011	07/11/2011	0,79 ± 0,22
Bure (55)	07/11/2011	10/11/2011	0,61 ± 0,25
Charleville-Mézières (08)	05/11/2011	10/11/2011	4,6 ± 0,5
Le Vésinet (78)	06/11/2011	09/11/2011	12 ± 6
Orsay (91)	04/11/2011	10/11/2011	4,2 ± 0,4

Des mesures de surveillance réalisées à Budapest au Frédéric Joliot-Curie National Research Institute for Radiobiology and Radiohygiene (NRIRR) et publiées régulièrement sur le site Internet de cet institut ont attesté de la proximité de la source d'iode avec un maximum de 173 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ mesuré fin septembre 2011. C'est par ailleurs dans la banlieue de Budapest que réside l'Institut des isotopes dont l'une des missions est de produire des isotopes radioactifs destinés à des applications dans le domaine médical, dans l'industrie et pour la recherche.

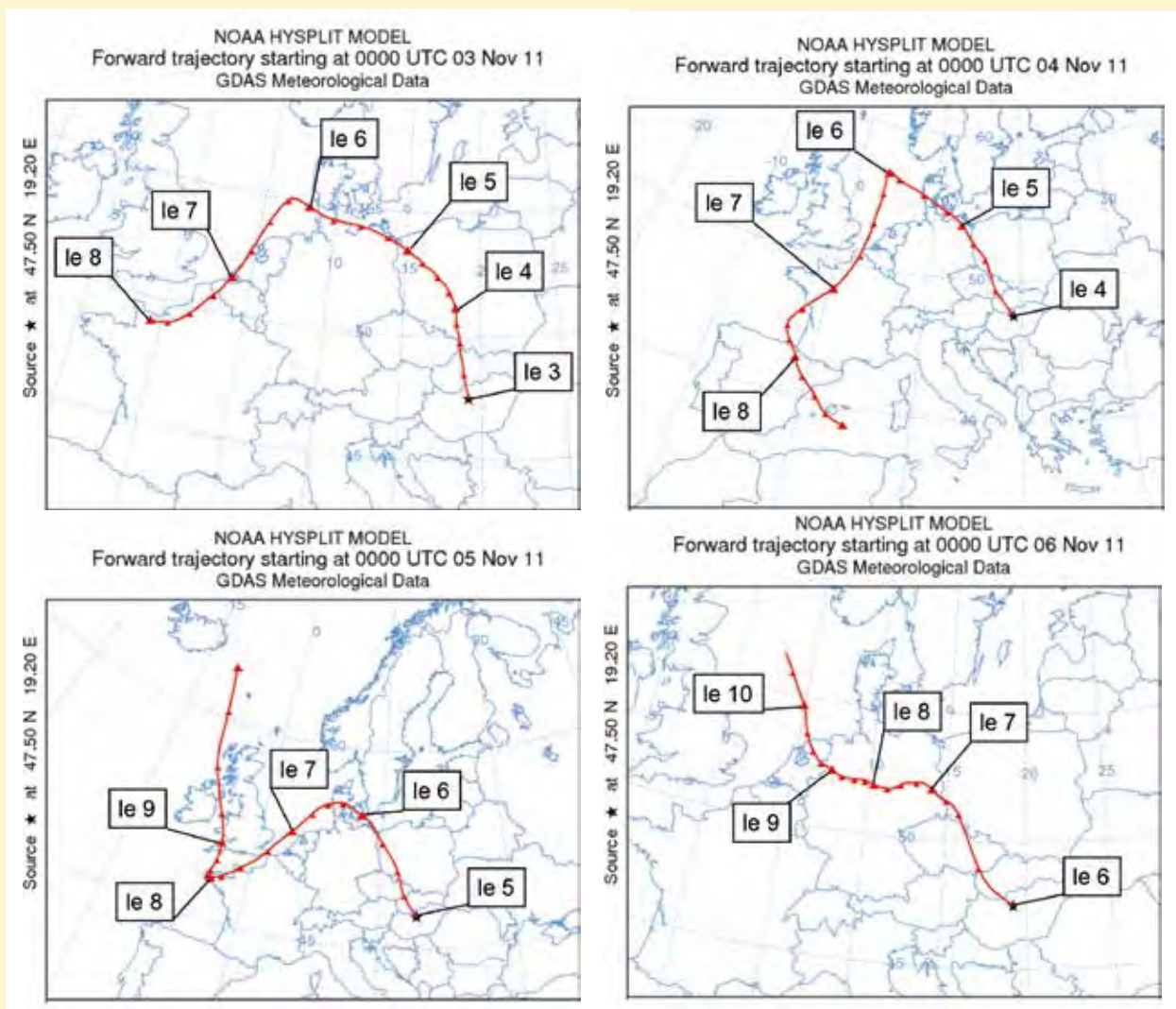
Selon les autorités hongroises, le rejet se serait produit à partir du 8 septembre 2011, avec un épisode de rejet plus important du 12 au 14 octobre. Sur l'ensemble de la période de rejet (entre début septembre et le 16 novembre 2011), environ 324 GBq d'iode 131 aurait été émis dans l'atmosphère, soit environ 20 % de l'autorisation de rejet. Un pic de rejet de 108 GBq se serait produit sur 48 heures, entre le 12 et le 14 octobre.

Les résultats des mesures significatives obtenues par l'IRSN dans le cadre de la surveillance spécifique mise en place sur le territoire métropolitain sont présentés dans le tableau II.15. Ils concernent majoritairement des prélèvements d'aérosols effectués sur des stations à grand débit ou à très grand débit de filtration, permettant d'atteindre des limites de détection très basses.

Afin de confirmer le lien entre ce rejet et la détection d'iode en France et en Europe, l'IRSN a entrepris une reconstitution des trajectoires des masses d'air (figure II.55), ce qui a permis de confirmer l'itinéraire des masses d'air sur l'Europe centrale et notamment leur passage par la Hongrie et plus précisément dans la région de Budapest.

Les résultats obtenus montrent que les masses d'air parties de Budapest les 3, 4 et 5 novembre ont atteint la France à partir du

Figure II.55 - Trajectoires des masses d'air au départ de Budapest, les 3, 4, 5 et 6 novembre 2011 (les triangles rouges situés le long du tracé donnent la position de la masse d'air toutes les 6 heures).



7 novembre, après avoir traversé la République tchèque, la Pologne, l'Allemagne et le Danemark. Les lieux et dates de détection d'iode 131 signalés par les autres pays d'Europe situés sous le parcours de ces masses d'air sont compatibles avec ces analyses de trajectoires.

Estimations dosimétriques

L'IRSN a réalisé des calculs des doses maximales dues à l'exposition au panache d'iode 131 en tenant compte des données des rejets fournies par les autorités hongroises et des données météorologiques et en se plaçant à deux kilomètres au sud-est du site, (zone de dépôt maximale). Les dépôts radioactifs provoqués par ces rejets ne seraient pas susceptibles d'avoir entraîné une contamination des denrées alimentaires dépassant les niveaux maximaux admissibles (valeurs maximales théoriques de la contamination des légumes à feuilles et du lait de vache au point de retombées maximales respectivement de 76 Bq/kg frais et 22 Bq/L). En considérant un enfant âgé de 2 à 7 ans (représentant une population particulièrement sensible aux effets des rayonnements) qui consommerait 70 g/j de légumes à feuilles (salade, épinards, etc.) et 60 g/j de lait, dont 70 à 80 % seraient d'origine locale, la dose équivalente à la thyroïde par ingestion sur un mois est estimée à 70 μ Sv. Il s'agit d'une estimation théorique, probablement largement majorante compte tenu de la saison et de l'environnement du site nucléaire hongrois.

Conclusion

Les traces d'iode 131 détectées en France et dans d'autres pays d'Europe centrale et du nord peuvent globalement être expliquées par un rejet provenant de l'Institut des isotopes de Budapest.

L'estimation de l'impact radiologique au voisinage du site où s'est produit le rejet, en considérant les caractéristiques des rejets communiquées par les autorités hongroises, conduit à des doses très faibles, même pour des « enfants d'un an sans aucune protection ». Les traces d'iode 131 détectées en France et dans d'autres pays d'Europe sont trop faibles pour entraîner un risque quelconque pour la santé.

L'iode 131 dans le milieu terrestre

Entre juillet 2011 et décembre 2012, l'iode 131 a été recherché dans 541 échantillons du milieu terrestre (faune, flore et denrées) : lait, légumes, herbe, fruits, céréales, vin, champignons, viande et miel.

Les résultats des mesures réalisées sont tous restés inférieurs aux limites de détection, confirmant ainsi que les traces d'iode 131 détectées dans les aérosols en France en novembre 2011 étaient trop faibles pour être mesurées après dépôt dans le compartiment terrestre.

L'iode 131 dans le milieu aquatique continental

L'iode 131 fait partie du spectre des radionucléides recherchés systématiquement dans les matières en suspension (MES) (figure II.56) collectées mensuellement dans les fleuves grâce à des bacs de décantation installés en parallèle des hydrocollecteurs dans des stations positionnées en aval des principaux sites nucléaires.

Sur les 424 mesures d'iode 131 effectuées sur les matières en suspension entre juillet 2011 et décembre 2012, seules 18 présentent des activités supérieures aux limites de détection et comprises entre $10,6 \pm 5$ Bq/kg sec et 203 ± 41 Bq/kg sec. Ces valeurs sont essentiellement observées dans la Seine en aval de Paris, ainsi que dans le Rhône et la Loire (tableau II.16).

Ces valeurs ne sont pas liées aux effluents liquides des installations nucléaires. L'iode 131 est en effet régulièrement mesuré en aval de grandes agglomérations disposant d'activités de médecines nucléaires.

Les urines et les selles des patients traités dans les services de médecine nucléaire peuvent présenter une activité significative durant quelques jours. Si la réglementation impose le stockage systématique temporaire des urines en provenance des chambres réservées aux patients subissant une radiothérapie à l'iode 131, les selles non stockées à l'hôpital en raison de leur potentiel d'induction de maladies nosocomiales rejoignent le réseau d'assainissement plus rapidement.

■ **Figure II.56** - Hydrocollecteur et bac de décantation des matières en suspension.



© F. Leprieur/IRSN

■ **Tableau II.16** - Activités massiques significatives en iode 131 mesurées entre juillet 2011 et décembre 2012 dans les matières en suspension prélevées dans les principaux fleuves français (Bq/kg sec).

Site surveillé	Commune	Fleuve	Date de début de prélèvement	Date de fin de prélèvement	Activité massique en iode 131 dans les matières en suspension (Bq/kg sec)
Aval Paris	Croissy-sur-Seine	Seine	01/07/2011	02/08/2011	107 ± 33
			05/08/2011	01/09/2011	30 ± 9
			06/09/2011	11/10/2011	203 ± 41
			12/10/2011	07/11/2011	176 ± 44
			02/12/2011	06/12/2011	46 ± 16
			11/04/2012	02/05/2012	32 ± 13
			31/05/2012	29/06/2012	45 ± 22
			29/06/2012	01/08/2012	78 ± 32
			31/10/2012	07/12/2012	40 ± 17
			07/12/2012	02/01/2013	22 ± 10
CNPE Saint-Alban	Salaise-sur-Sanne	Rhône	01/07/2011	01/08/2011	19 ± 5
			01/08/2011	01/09/2011	15 ± 6
			01/04/2012	01/05/2012	27 ± 11
			19/06/2012	01/07/2012	10,6 ± 5
CNPE Chinon	Candes-Saint-Martin	Loire	01/07/2011	01/08/2011	15 ± 6

L'iode 131 ainsi introduit dans l'environnement peut être détecté dans les stations d'épuration et les cours d'eau. Les stations d'épuration ne disposent pas de procédés spécifiques pour le traitement des produits radioactifs. Cependant, les procédés habituellement utilisés dans ces installations conduisent à fixer préférentiellement l'iode 131 dans les boues d'épuration. Malgré cela, une proportion d'iode 131 est susceptible de se retrouver dans la rivière, en aval de la station d'épuration. Du fait de la dilution induite par le cours d'eau en aval de ce type d'installation, il est très difficile de détecter ce radionucléide dans l'eau. Par contre, il est parfois mesuré dans les matières en suspension (figure II.57) et le plus souvent dans les végétaux aquatiques.

Sur la période d'analyse de ce bilan, 61 échantillons de sédiment de rivière ont été prélevés en aval des établissements Areva de La Hague et de Pierrelatte, ainsi que des principaux centres de recherche du CEA (Bruyères-le-Châtel, Cadarache, Grenoble, Marcoule et Saclay). Les mesures d'iode 131 effectuées par spectrométrie gamma sont toutes restées inférieures aux limites de détection des appareils utilisés.

Trois lots de poissons (carpes, barbeaux) ont été prélevés par les agents des directions départementales de la cohésion sociale et de la protection des populations (DDCSPP) dans la Loire, la Vienne et le Rhône. Les activités mesurées sont également restées inférieures aux limites de détection (de l'ordre de 5 Bq/kg frais).

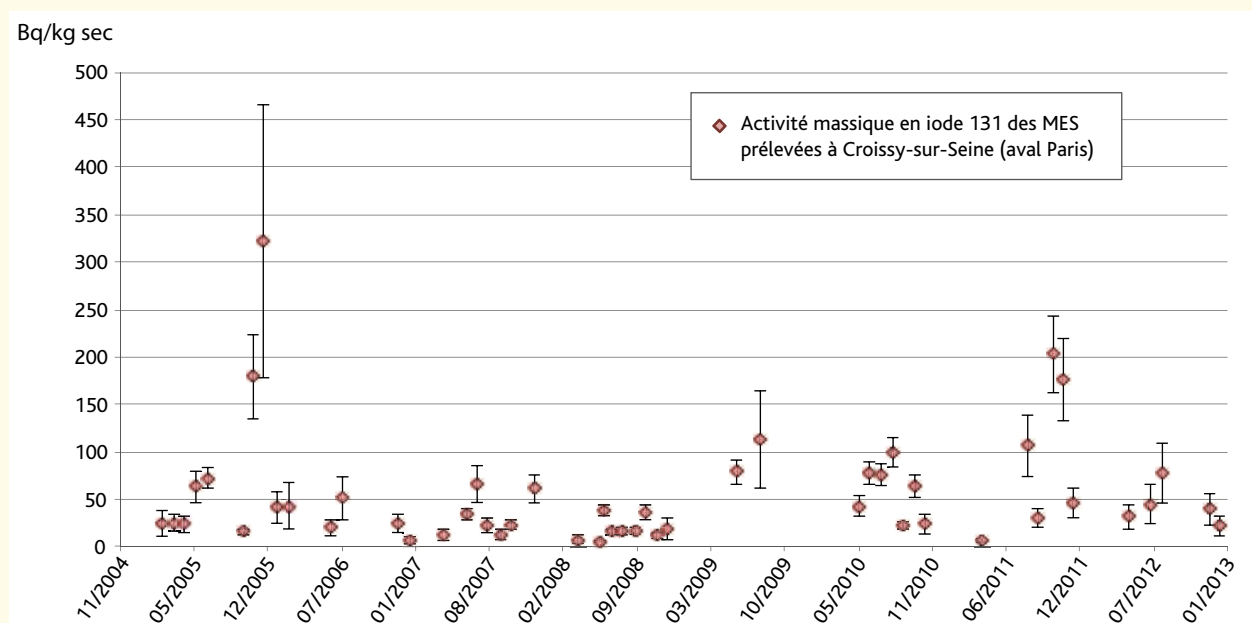
L'iode 131 dans le milieu littoral et marin

45 mesures d'iode 131 ont été effectuées sur les matières en suspension collectées au niveau des hydrocollecteurs des CNPE de Paluel, Penly et Gravelines. Des échantillons de sédiments, d'algues, de crustacés et de poissons ont été prélevés en 2011 et 2012 sur l'ensemble du littoral français (mer du nord, Manche, Atlantique et Méditerranée). Ces analyses n'ont mis en évidence aucune activité décelable en iode 131 dans ces échantillons.

En résumé

En fonctionnement normal, les rejets d'iode 131 par les installations nucléaires sont relativement faibles. En revanche, on peut retrouver de l'iode dans les effluents hospitaliers puis dans les stations d'épuration et les cours d'eau. Compte tenu des phénomènes de dilution et de la décroissance rapide de l'iode 131, il est difficile de le détecter dans l'eau, mais son accumulation peut être observée dans les matières en suspension et les végétaux aquatiques. Dans l'air, l'iode n'est détecté qu'à la suite d'un épisode de rejets maîtrisés ou non (voir focus page 82).

Figure II.57 - Activités massiques significatives en iode 131 des matières en suspension prélevées à Croissy-sur-Seine, en aval de Paris, entre 2004 et 2012 (Bq/kg sec).



II.8 LES AUTRES PRODUITS DE FISSION ET D'ACTIVATION

Généralités

La détermination de l'activité des produits de fission ou d'activation tels que le manganèse 54, le cobalt 60, l'antimoine 124, l'iode 129, l'argent 110m et le ruthénium 106 est réalisée par spectrométrie gamma (figure II.58). Pour cela, l'échantillon est conditionné dans une géométrie de comptage puis mesuré avec un détecteur Ge HP étalonné avec un étalon multi-gammas raccordé de géométrie équivalente à celle de l'échantillon. Selon les radionucléides et les performances recherchés, l'échantillon est conditionné à l'état frais, sec ou calciné.

Les antimoinnes (^{124}Sb , ^{125}Sb)

Parmi les 42 isotopes radioactifs de l'antimoine, les principaux sont l'antimoine 124 (^{124}Sb ; 60 j), l'antimoine 126 (^{126}Sb ; 12,4 j) et surtout l'antimoine 125 (^{125}Sb ; 2,73 ans) qui présente la période la plus longue.

L'antimoine 125 n'existe pas à l'état naturel. Il s'agit d'un produit de fission issu principalement :

- des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires (524 PBq) ;
- des effluents liquides des usines de traitement de combustibles usés dans lesquels il est présent, éventuellement avec l'isotope 124. À l'usine Areva NC de La Hague, l'antimoine 124 est rejeté à raison de moins de 1 GBq par an et 1 000 à 20 000 GBq par an pour l'antimoine 125. Seul ce dernier isotope est recensé à Sellafield (Royaume-Uni), dans des ordres de grandeur comparables.

L'antimoine 124 et l'antimoine 125 sont tous les deux présents dans les effluents liquides du parc électronucléaire EDF : les activités respectives rejetées en 2012 représentaient environ 3 et 6 % de l'activité gamma totale rejetée annuellement sous forme liquide (figure II.59). L'isotope 125 est également rejeté par d'autres centrales européennes, pour lesquelles il constituait en 1993 jusqu'à 30 % de l'activité gamma totale rejetée.

Occasionnellement mesurés à l'état de traces dans les milieux aquatiques marin et continental dans les années 1990 du fait de leur présence dans les effluents liquides radioactifs des installations nucléaires, les isotopes 124 et 125 de cet élément ne sont pratiquement plus détectés dans l'environnement, quel que soit le milieu échantillonné.

Les argents (^{108}Ag , $^{108\text{m}}\text{Ag}$, ^{110}Ag , $^{110\text{m}}\text{Ag}$)

L'argent possède deux isotopes stables (107 et 109) qui constituent l'argent naturel avec des abondances relatives respectives de 51,35 % et 48,65 %. Il possède 48 radio-isotopes, mais seul l'argent 110m est détecté dans l'environnement.

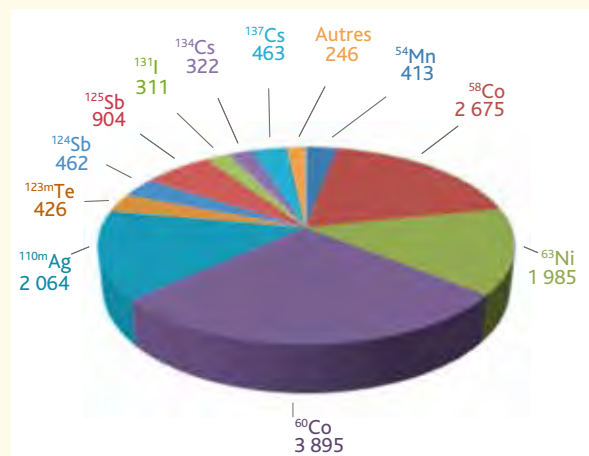
L'argent 110m n'existe pas à l'état naturel. Il est émis par les installations nucléaires en fonctionnement normal et peut être rejeté au cours d'accidents. C'est un produit d'activation de l'isotope 109. Dans les réacteurs à eau pressurisée, la principale source de l'argent 110m résulte de l'usure des gaines contenant les crayons de combustibles, constituées d'un alliage ternaire (Ag – In – Cd). Une faible proportion de l'argent 110m peut également provenir des matériaux de corrosion du revêtement d'argent de certaines pièces du circuit primaire. En 2012, pour le parc électronucléaire français, l'argent 110m a représenté environ 15 % de l'activité gamma totale rejetée sous forme liquide soit une activité de 2,06 GBq. Dans le cas de l'accident de Tchernobyl, l'argent 110m émis

Figure II.58 - Spectromètre gamma surmonté d'un passeur d'échantillons.



© A. Delattre

Figure II.59 - Activités des radionucléides rejetés sous forme liquide (hors tritium et carbone 14) par les CNPE en 2012 (Bq).



avait pour origine essentielle l'activation de l'isotope 109 constituant l'argent naturel des 200 détecteurs neutroniques équipant le cœur du réacteur.

En milieu terrestre, le bruit de fond engendré par l'argent 110m est négligeable. La plupart des mesures dans l'environnement supérieures aux limites de détection concernent le milieu aquatique continental, et plus particulièrement les sédiments et les végétaux aquatiques situés dans des zones soumises à l'influence de rejets d'effluents liquides radioactifs par les installations nucléaires.

Les cériums (^{141}Ce , ^{144}Ce)

On connaît 15 isotopes artificiels et deux isomères nucléaires du cérium. Les plus lourds d'entre eux (masse atomique de 143 à 148) sont des produits de fission, le plus important d'un point de vue radioécologique étant le cérium 144 (période : 284,5 jours).

Le cérium 144 susceptible d'être trouvé dans le milieu naturel est d'origine essentiellement artificielle. Il peut provenir de trois sources :

• Explosions nucléaires atmosphériques

Pendant la période 1945-1962, les essais nucléaires atmosphériques ont libéré dans l'environnement de l'ordre de $2,2 \cdot 10^{19}$ Bq de cérium 144 et $3,15 \cdot 10^{20}$ Bq de cérium 141 (période radioactive : 32,5 jours), qui se sont répartis sur l'ensemble de la planète. Étant donné leur ancienneté et la période radioactive des cériums, ces rejets ne sont aujourd'hui plus détectables dans l'environnement.

• Émissions par les installations nucléaires

Actuellement, les sources de cérium proviennent des centrales nucléaires et des usines de retraitement du combustible. Pour un réacteur à eau pressurisée en fonctionnement normal, les rejets de cérium 144 dans les effluents liquides sont de l'ordre de 3 MBq par MWe et par an. Dans ces effluents, le rapport cérium 144/cérium 141 est de 10 pour un combustible ayant fonctionné un an. À l'usine Areva NC de La Hague, le cérium 144 représente une part importante, de l'ordre de 12 %, des rejets bêta globaux.

• Rejets accidentels

Pour chacun des deux isotopes 141 et 144, on estime à $1 \cdot 10^{17}$ Bq les activités en cérium rejetées dans le milieu naturel lors de l'accident de Tchernobyl.

Les cobalts (^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co)

Parmi les 18 radio-isotopes du cobalt (ou radiocobalt), trois sont considérés dans les rejets : le cobalt 57, de période 2,7 j ; le cobalt 58, de période 7,1 j, et le cobalt 60 qui présente une période radioactive significative (5,27 ans).

Le cobalt 60 est un produit d'activation formé à partir des matériaux de structure des réacteurs nucléaires. Il peut

aussi être produit industriellement à partir de l'activation neutronique du cobalt stable. Il est utilisé en médecine nucléaire. En 2012, les radiocobalts représentaient près de 46 % de l'activité gamma totale rejetée sous forme liquide par l'ensemble des centrales nucléaires EDF, à raison de 2,7 GBq de cobalt 58 et 3,9 GBq de cobalt 60.

Dans les usines de retraitement, le cobalt provient des assemblages combustibles sur lesquels se sont fixés des produits d'activation, sous forme d'oxydes. Il est rejeté essentiellement sous forme liquide. Les activités des effluents en cobalt 60 étaient en 2012 de 83,4 GBq pour l'usine de La Hague ; à l'usine de Sellafied, le rejet était en 2011 de 60 GBq. Jusqu'en 1997, l'usine de Marcoule a rejeté jusqu'à 30 GBq par an de cobalt 60 dans le Rhône. Depuis, cette activité a bien diminué (61,3 GBq en 2012 pour l'ensemble des émetteurs bêta-gamma).

Enfin, le cobalt 60 fait partie des radionucléides présents dans les déchets nucléaires (type moyenne activité à vie longue – MAVL).

Dans le milieu terrestre, en raison de l'absence de rejets atmosphériques, le bruit de fond engendré par les radiocobalts est négligeable. La plupart des mesures effectuées dans l'environnement présentant des activités supérieures aux limites de détection concernent, d'une part, le milieu aquatique continental, notamment les végétaux aquatiques situés sous influence de rejets d'effluents liquides radioactifs par les installations nucléaires et, d'autre part, le milieu marin à proximité des centres nucléaires de production d'électricité et des usines de traitement des combustibles usés.

En Manche, les activités volumiques en cobalt 60 dans l'eau de mer au cours des dix dernières années sont en général inférieures à 0,5 mBq/L.

L'iode 129 (^{129}I)

L'iode 129 est créé naturellement lors des quelques fissions spontanées qui se produisent dans l'uranium naturel. De période longue ($1,57 \cdot 10^7$ ans), il s'accumule notamment dans les océans où le stock global est évalué à environ 7 GBq.

L'iode 129 artificiel peut provenir de trois sources :

• Explosions nucléaires atmosphériques

Pendant la période 1945-1962, les essais nucléaires atmosphériques ont libéré dans l'environnement une quantité d'iode 129 estimée à 400 GBq. La quasi-totalité de cet iode s'est déposée au sol sur l'ensemble de la planète.

• Génération au sein des réacteurs nucléaires

Le cœur d'un réacteur en fonctionnement renferme une quantité importante d'iode 129. Pour un réacteur à eau pressurisée de 1 300 MWe, l'activité présente en fin de cycle est de l'ordre de 75 GBq. Lors des opérations de traitement du combustible irradié, l'ensemble des produits de fission est extrait. Compte tenu du temps passé entre le déchargement du combustible et son retraitement (plusieurs années), l'iode 129 est encore présent.

• Rejets des installations nucléaires

Pour un réacteur nucléaire à eau pressurisée, l'activité rejetée en iode 129 est négligeable. En revanche, pour l'usine de traitement de La Hague, l'activité rejetée annuellement en iode 129 dans les effluents a été de 1,84 TBq en 1999 dont 99 % sous forme liquide (en 2012, les rejets en iodes radioactifs sous forme liquide ont représenté 1,3 TBq). Pour l'usine de Sellafield au Royaume-Uni, les rejets gazeux d'iode 129 se sont élevés en 2011 à 12 GBq et les rejets liquides à 0,4 TBq.

Les ruthéniums (^{103}Ru , ^{106}Ru)

Le ruthénium est un produit de fission présentant une radio-toxicité élevée, notamment au travers de ses isotopes ^{106}Ru ($T_{1/2} = 371$ j) et ^{103}Ru ($T_{1/2} = 39,3$ j).

Le ruthénium 106 est l'un des radionucléides rejetés lors des essais atmosphériques des armes nucléaires, qui ont commencé en 1945 par un essai des USA, et se sont achevés en 1980 par le dernier tir chinois.

Actuellement, le ruthénium est formé en quantité significative pendant le fonctionnement d'un réacteur nucléaire (essentiellement par fissions directes de l'uranium 235 et du plutonium 239). Cette quantité augmente proportionnellement avec le taux de combustion du combustible. En outre, la teneur en ruthénium est plus importante dans un combustible MOX que dans un combustible UO_2 classique.

En 2012, l'usine d'Areva NC La Hague a rejeté 1,22 TBq de ruthénium 106 en Manche. Ces activités se sont élevées à 2,0 TBq en 2011 en ce qui concerne les rejets liquides de l'usine de Sellafield.

Le manganèse 54 (^{54}Mn)

Dans les réacteurs nucléaires, le manganèse 54 est un produit d'activation du fer stable des structures (réaction n, p sur le fer 54), entraîné à la suite de phénomènes de corrosion et d'érosion sous forme particulaire dans le flux neutronique du réacteur. Actuellement, le radio-manganèse représente environ 3 % de l'activité gamma totale rejetée sous forme liquide par le parc électronucléaire EDF, soit de l'ordre de 0,4 GBq par an. Dans le cas des usines de traitement du combustible usé, le manganèse provient des assemblages combustibles sur lesquels se fixent des produits d'activation, sous forme d'oxydes. Lors de l'opération de dissolution du combustible, le manganèse est remis en solution. L'activité rejetée en manganèse 54 se présente essentiellement sous forme liquide, elle s'élève à environ 2-3 GBq par an pour l'usine de La Hague.

En milieu terrestre, le bruit de fond engendré par le radio-manganèse est négligeable. La plupart des mesures réalisées dans l'environnement supérieures aux limites de détection concernent le milieu aquatique continental, et plus particulièrement les mousses aquatiques situées dans des zones soumises à l'influence de rejets d'effluents liquides radioactifs par les installations nucléaires.

Les tellures (^{132}Te , ^{123m}Te)

Le tellure est par importance le 80^e élément constituant l'écorce terrestre ; celle-ci en contient 10⁻⁷ % jusqu'à une profondeur de 16 kilomètres. Le tellure naturel est un mélange de huit isotopes (^{120}Te , ^{122}Te , ^{123}Te , ^{124}Te , ^{125}Te , ^{126}Te , ^{128}Te et ^{130}Te). Parmi ceux-ci, deux sont radioactifs avec de très longues périodes (^{123}Te : 1.10¹³ ans et ^{128}Te : 7,7.10²⁴ ans).

Les deux principaux isotopes artificiels sont le tellure 132 et le tellure 123m. Le premier est un produit de fission et le second est produit artificiellement pour être utilisé comme traceur expérimental. Le tellure 132 peut descendre de l'antimoine 132 par désintégration bêta et le tellure 123m peut provenir de la désintégration par capture d'électron de l'iode 123.

Suite à l'accident de Tchernobyl, la quantité de tellure 132 rejetée a été évaluée entre 150 et 1 150 PBq et représentait environ 30 % de l'activité totale en tellure 132 du cœur.

Les autres produits de fission et d'activation dans le compartiment atmosphérique

Les aérosols

Aucun autre produit de fission et d'activation n'a été détecté sur les filtres aérosols issus des stations de prélèvements d'aérosols de l'IRSN déployées en routine en métropole (dont 28 sont implantées sous l'influence potentielle d'une installation nucléaire) et analysés entre juillet 2011 et décembre 2012 par l'IRSN.

Les stations grand débit et très grand débit de l'IRSN avaient permis d'identifier et de quantifier les couples « tellure 132 – iode 132 » et « tellure 129 – tellure 129m » en avril 2011 à la suite de l'accident de Fukushima (*voir le rapport IRSN – Analyse de l'impact de l'accident de Fukushima en France*). Ces radionucléides ont cependant rapidement disparu et n'étaient plus quantifiables de façon significative (valeur supérieure à la limite de détection des appareils de mesure) à la fin du mois d'avril 2011.

Les autres produits de fission et d'activation dans le compartiment terrestre

Flore terrestre

Les radionucléides artificiels émetteurs gamma sont régulièrement recherchés dans les végétaux terrestres (herbe, pâturage, feuilles d'arbre) prélevés à proximité des sites de La Hague, Marcoule, du complexe industriel du Tricastin, d'Areva Malvézi, du CEA Saclay et de l'ILL Grenoble. Parmi les analyses effectuées en 2011 et 2012, seul l'iode 129 a été détecté au sud du site de La Hague (neuf mesures significatives sur les 23 analyses réalisées entre janvier 2011 et décembre 2012). Sur cette période, l'activité massique moyenne relevée est de $1,83 \pm 0,15$ Bq/kg de matière sèche avec un maximum observé à $10,3 \pm 2,575$ Bq/kg de matière sèche sur le prélèvement du

5 avril 2011 (figure II.60). Les niveaux en iode 129 mesurés sont directement imputables aux rejets des installations du site de La Hague.

Productions agricoles et aliments

Lait

L'iode 129 est détecté assez régulièrement dans le lait de vache collecté dans des fermes situées sur les communes de Digulleville (quatre résultats significatifs sur les six analyses réalisées en 2011 et 2012) et Herqueville (trois résultats significatifs sur les six analyses réalisées en 2011 et 2012) dans le département de la Manche (50). Les concentrations relevées sont en moyenne de $0,0081 \pm 0,0017$ Bq/L à Digulleville (activité volumique maximale de $0,051 \pm 0,02$ Bq/L observée sur le prélèvement du 2 avril 2012) et de $0,0075 \pm 0,0017$ Bq/L à Herqueville (figure II.61). Celles-ci témoignent de l'influence des rejets d'iode 129 provenant du site de La Hague.

Les autres produits de fission et d'activation (argent 110m, cobalt 58, cobalt 60...) n'ont pas été détectés dans les laits collectés sous et hors influence potentielle des rejets des installations nucléaires (216 échantillons de métropole et d'outre-mer analysés en 2011 et 2012).

Viande d'élevage et gibier

Aucun autre produit de fission et d'activation n'a été mesuré dans les viandes (animaux d'élevage, gibiers) prélevées en 2011 et 2012 dans les départements de la Gironde (33), des

Pyrénées-Atlantiques (64) et des Hautes-Pyrénées (65), et à proximité des sites nucléaires de La Hague (50), Tricastin (26), Marcoule (30), Cadarache (13), Blayais (33), Chooz (08), Civaux (86) et Brennilis (29).

Céréales

L'analyse par spectrométrie gamma des échantillons de céréales (blé, maïs) récoltés en 2011 et 2012 dans des silos et magasins départementaux situés hors zone d'influence de toute installation nucléaire d'une part, et situés au voisinage des 31 installations nucléaires d'autre part, n'a pas permis de mettre en évidence la présence de produits de fission et d'activation autres que le césium.

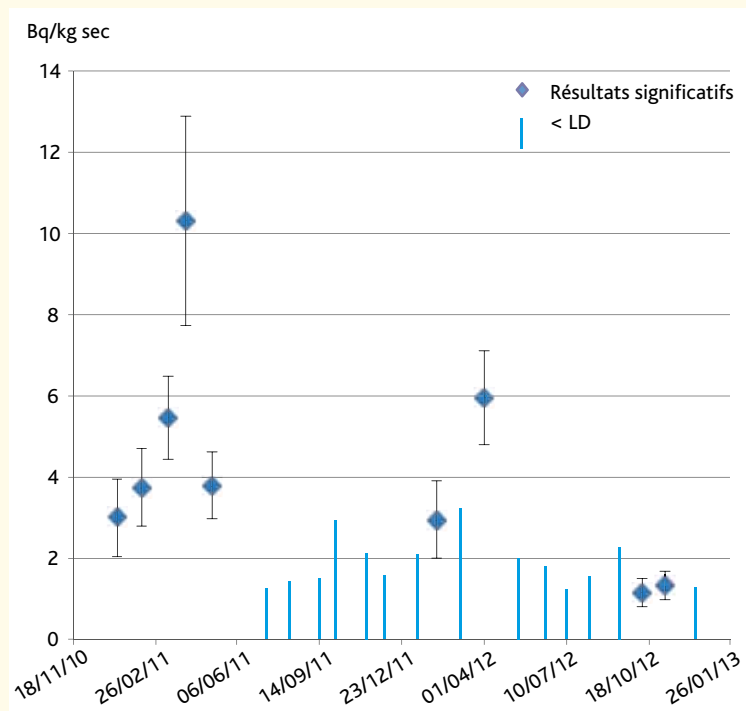
Fruits, légumes, champignons

En 2011 et 2012, la recherche de radioactivité artificielle dans les fruits, légumes et champignons prélevés sous l'influence potentielle des rejets des installations nucléaires françaises n'a pas permis de révéler la présence des autres produits de fission et d'activation dans ces denrées. De même, les résultats d'analyses effectuées sur quelques champignons métropolitains collectés hors influence de tout rejet industriel sont restés inférieurs aux limites de détection des appareils de mesures utilisés. Cette remarque se confirme également outre-mer, où quelques mesures ont été effectuées notamment sur l'île de La Réunion.

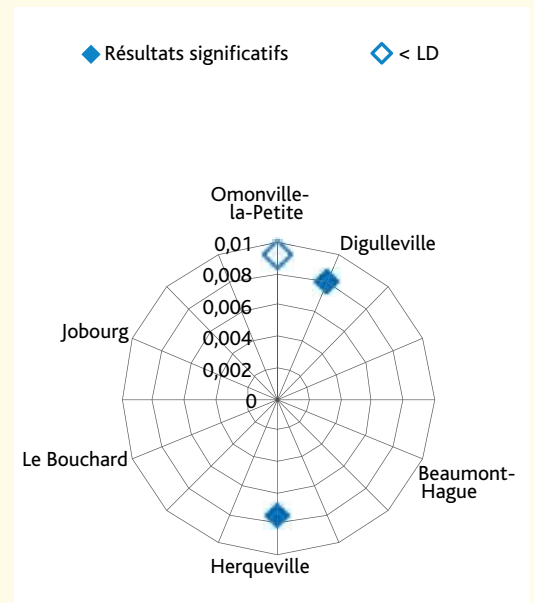
Boissons alcoolisées (vins, champagne)

Les produits de fission et d'activation autres que le césium recherchés dans des prélèvements annuels de vins et de

■ Figure II.60 - Activités massiques en iode 129 mesurées dans les herbes prélevées à moins d'un kilomètre au sud du site de La Hague (Bq/kg sec).



■ Figure II.61 - Distribution moyenne de l'iode 129 dans le lait produit aux abords de l'usine de La Hague (Bq/L).



champagne produits à proximité immédiate des installations nucléaires françaises n'ont pas été détectés sur les récoltes 2010 et 2011.

Autres productions agricoles

Miel

Aucune trace de radioactivité artificielle n'a été mise en évidence sur le miel produit en 2011 dans les départements des Pyrénées-Atlantiques (64) et des Hautes-Pyrénées (65).

Les autres produits de fission et d'activation dans le compartiment aquatique continental

Aujourd'hui, les produits de fission et d'activation autres que le césium (*chapitre II.5*) et l'iode 131 (*chapitre II.7*) présents dans les grands fleuves et rivières françaises ont essentiellement pour origine les rejets des industries du cycle du combustible nucléaire implantées sur les berges de ces cours d'eau. En aval des installations nucléaires, les éléments régulièrement et encore détectés en 2011-2012 sont, par ordre de niveau d'activité décroissant, le cobalt 60, l'argent 110m et le cobalt 58, éléments globalement prépondérants des rejets. Le manganèse 54 est mesuré plus ponctuellement.

Eau de surface

Les produits de fission et d'activation autres que le césium et l'iode 131 n'ont pas été détectés dans l'eau prélevée dans les grands fleuves et rivières françaises en aval direct ou lointain des rejets d'effluents liquides des installations nucléaires.

Matières en suspension et sédiments

Matières en suspension (MES)

L'analyse des résultats de radioactivité mesurée entre janvier 2011 et décembre 2012 au niveau des vingt stations de prélèvements de matières en suspension (hydrocollecteurs en champs proche et éloigné des installations nucléaires) montre la présence régulière de produits de fission et d'activation tels que le cobalt 60 (mesuré sur onze stations), l'argent 110m (mesuré sur neuf stations), le cobalt 58 (mesuré sur cinq stations), et plus occasionnellement le manganèse 54 (mesuré sur deux stations). Les principaux résultats d'analyses sont présentés sur la figure II.62. Ces faibles niveaux de radioactivité, habituellement observés, sont directement imputables aux rejets liquides autorisés des installations nucléaires.

Sédiments

Des prélèvements semestriels ou annuels de sédiments sont réalisés en amont et en aval des principales installations nucléaires du Rhône et de ses affluents (complexe nucléaire du Tricastin, site de Marcoule, ILL Grenoble), et à proximité des sites de La Hague, Saclay, Bruyères-le-Châtel et Cadarache.

Figure II.62 - Moyenne pondérée des activités massiques pour les MES de l'ensemble des points de collecte des cours d'eau du territoire (Bq/kg sec).



Sur le bassin versant rhodanien, la présence de radionucléides artificiels émetteurs gamma tels que le cobalt 60, l'argent 110m, le cobalt 58 et le manganèse 54 est régulièrement observée (figure II.63). L'introduction de radioactivité dans le milieu aquatique s'effectue principalement par les rejets d'effluents liquides des centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) et par ceux des sites de Marcoule et Tricastin. Une étude récente a montré que les radionucléides spécifiques des seuls rejets de l'industrie nucléaire (cobalt 58, cobalt 60, argent 110m, antimoine 124, antimoine 125 et manganèse 54) sont très certainement rapidement exportés en Méditerranée, expliquant ainsi une activité en cobalt 60 de $2,4 \pm 0,7$ Bq/kg sec relevée sur l'échantillon de sédiment prélevé le 11 juin 2012 à Port-Saint-Louis-du-Rhône. Une partie du cobalt 60 et du cobalt 58 rejetés par les industriels est probablement stockée dans le compartiment sédimentaire du fleuve.

Par ailleurs, on observe un marquage rémanent des sédiments de l'aqueduc des Mineurs, via lequel transitent les rejets d'effluents liquides du centre de Saclay, par le cobalt 60 (activité massique maximale relevée : $3,2 \pm 0,5$ Bq/kg sec le 28 septembre 2011).

Enfin, le sédiment prélevé le 4 avril 2012 dans le bassin de rétention des Moulinets, au sud du site de La Hague, présentait une activité en iode 129 de $3 \pm 0,8$ Bq/kg sec attribuable aux rejets de cette usine.

Flore aquatique continentale

En 2011 et 2012, les produits de fission et d'activation autres que le césium et l'iode 131 n'ont pas été détectés dans les échantillons de phanérogames aquatiques (roseau, myriophylle, potamot) prélevés semestriellement en amont et en aval des sites du Tricastin et de Marcoule, et annuellement en aval du CEA Saclay.

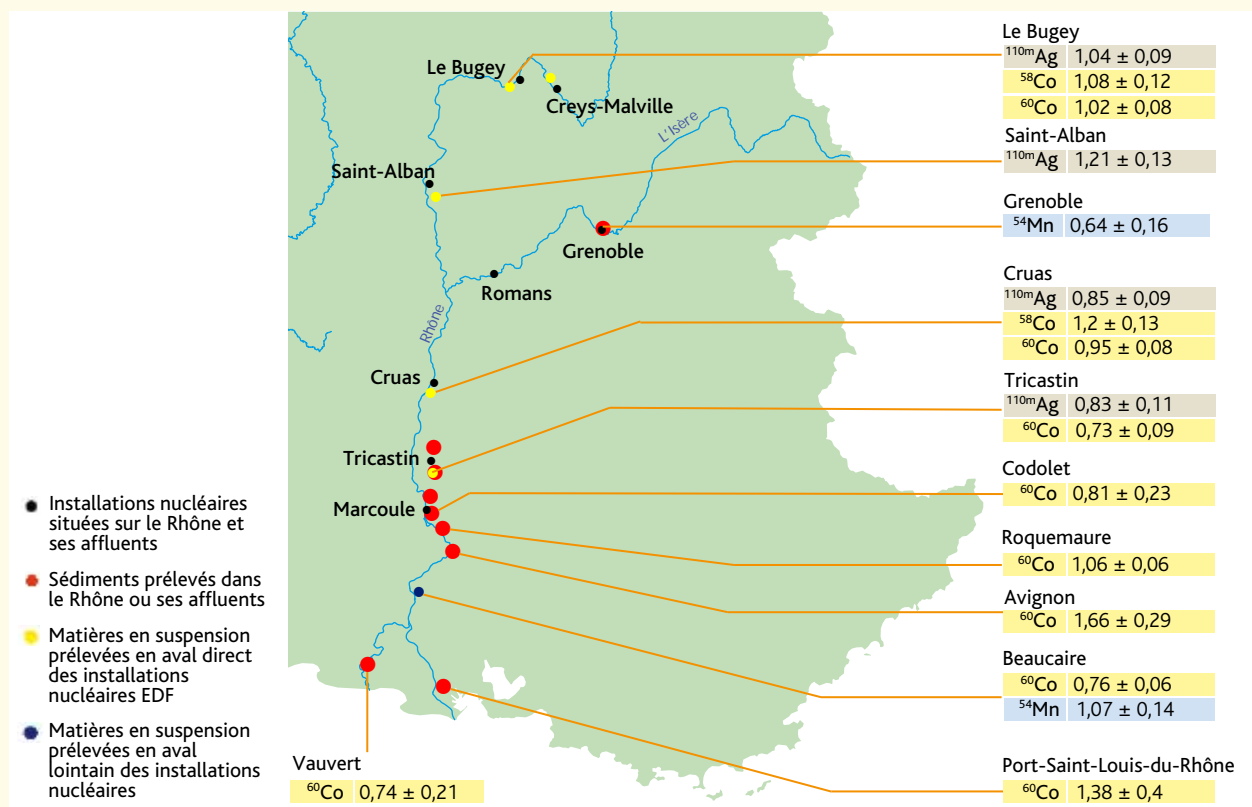
Faune aquatique continentale (poissons)

En 2011 et 2012, des poissons ont été pêchés en aval hydraulique des centrales nucléaires de production d'électricité de Saint-Laurent-des-Eaux, Civaux, Golfech, Bugey et du Tricastin. Seuls les poissons pêchés (mélange d'espèces) le 10 août 2011 à 200 mètres environ en aval de la centrale du Bugey présentaient des niveaux d'activité en argent 110m et cobalt 58, significatifs mais proches des limites de détection, respectivement de $0,069 \pm 0,024$ et de $0,068 \pm 0,024$ Bq/kg de matière fraîche.

Les autres produits de fission et d'activation dans le compartiment aquatique marin

Les principaux apports en radionucléides artificiels émetteurs gamma dans le milieu marin proviennent essentiellement des rejets :

Figure II.63 - Moyenne pondérée des activités massiques sur les matières en suspension et les sédiments de la vallée du Rhône (Bq/kg sec).



- de l'usine de traitement des combustibles usés d'Areva NC La Hague en Manche ;
- de l'usine de traitement des combustibles usés de Sellafield en Angleterre, dont une partie de la radioactivité se retrouve en Manche et en mer du Nord ;
- des centrales nucléaires de production d'électricité situées sur la façade Manche – mer du Nord (Flamanville, Paluel, Penly, Gravelines) ;
- du port militaire de Cherbourg ;
- des industries du cycle du combustible nucléaire implantées sur les berges des grands fleuves français (phénomène de drainage de la radioactivité vers les mers et les océans).

Eau de mer

Un résultat significatif en antimoine 125 ($0,00047 \pm 0,00028$ Bq/L) a été observé dans un échantillon d'eau de mer prélevé le 16 novembre 2012 au port de Goury, situé à proximité immédiate de l'émissaire de rejet de La Hague.

Les autres résultats d'analyses sont restés inférieurs aux limites de détection des appareils utilisés.

Matières en suspension et sédiments

Matières en suspension (MES)

Afin d'optimiser la dispersion des rejets d'effluents liquides en mer, les CNPE de Flamanville, Paluel et Penly effectuent leurs rejets en pleine mer *via* une conduite sous-marine. Ces émissaires conduisent à une dilution dans le milieu marin en

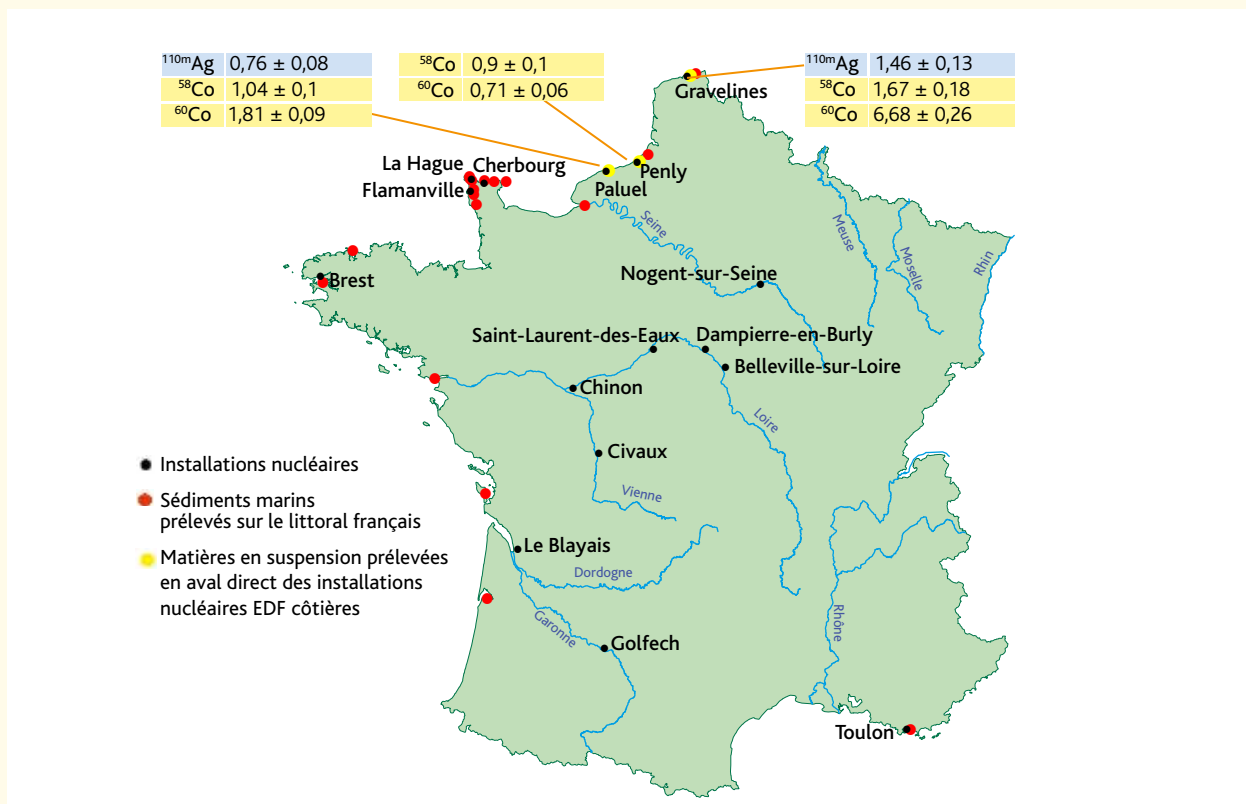
un point peu accessible à la mise en place d'un équipement de prélèvement en continu. Afin de pallier cette difficulté technique, des hydrocollecteurs sont implantés au sein de l'ouvrage de rejet (bassin ou puits de rejet), en amont des rejets en mer. Les concentrations mesurées au niveau de ces hydrocollecteurs informent donc sur l'évolution de l'activité moyenne mensuelle rejetée par le CNPE, mais pas du niveau du milieu marin.

En ce qui concerne le CNPE de Gravelines, la conception de l'ouvrage de rejet est différente. Les rejets sont effectués dans le canal marin qui débouche ensuite sur le littoral, constituant de ce fait un milieu récepteur intermédiaire avant dilution en mer. Un hydrocollecteur est implanté au niveau de ce canal, à 1 000 mètres en aval des rejets de tranche.

Les concentrations mesurées au niveau de ces dispositifs sont donc supérieures à celles qui seraient mesurées directement dans le milieu marin.

En 2011 et 2012, le cobalt 60, le cobalt 58 et l'argent 110m ont été mesurés régulièrement sur les matières en suspension collectées mensuellement au niveau des hydrocollecteurs de Paluel, Penly et Gravelines. Sur ces matières en suspension s'adsorbent de nombreux radionucléides (*figure II.64*). À noter que les activités relevées fluctuent beaucoup d'un mois à l'autre, en corrélation avec les rejets d'effluents liquides autorisés du CNPE surveillé. Aussi, les activités massiques mesurées en cobalt 60 sur les MES décantées sur la station de Gravelines, entre janvier 2011 et décembre 2012, oscillent entre $3,9 \pm 0,7$ et $19 \pm 2,6$ Bq/kg sec.

■ **Figure II.64** - Moyenne pondérée des activités massiques pour l'ensemble des matières en suspension (MES) prélevées en aval direct des centrales électriques marines (Bq/kg sec).



Sédiments

Des sédiments marins (vase, sable de plage) ont été prélevés en 2011 et 2012 en différentes stations situées le long du littoral de la Méditerranée, de l'Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord (figure II.64, page 93). Les fréquences de prélèvement diffèrent d'une station à une autre.

L'analyse de ces sédiments révèle la présence de cobalt 60 en Manche, de Carteret à Mers-les-Bains, liée principalement aux rejets d'effluents liquides passés et présents des installations du site de La Hague, auxquels viennent s'ajouter les rejets liquides du site de Sellafield en Angleterre. Les activités mesurées restent faibles et ne mettent en évidence aucune anomalie. Elles sont du même ordre de grandeur que celles mesurées ces dernières années. Les valeurs les plus élevées sont observées à proximité immédiate de l'émissaire de rejet de La Hague (activité maximale de $5,2 \pm 1$ Bq/kg sec mesurée en avril 2011 au niveau de l'anse des Moulinets, station de prélèvement située sous l'influence directe des rejets du site industriel de La Hague). À plus grande distance, les activités sont souvent proches des limites de détection ou des niveaux habituellement rencontrés loin de toute activité nucléaire (figure II.65).

Les autres produits de fission et d'activation n'ont pas été détectés dans l'Atlantique, la Méditerranée ou la mer du Nord.

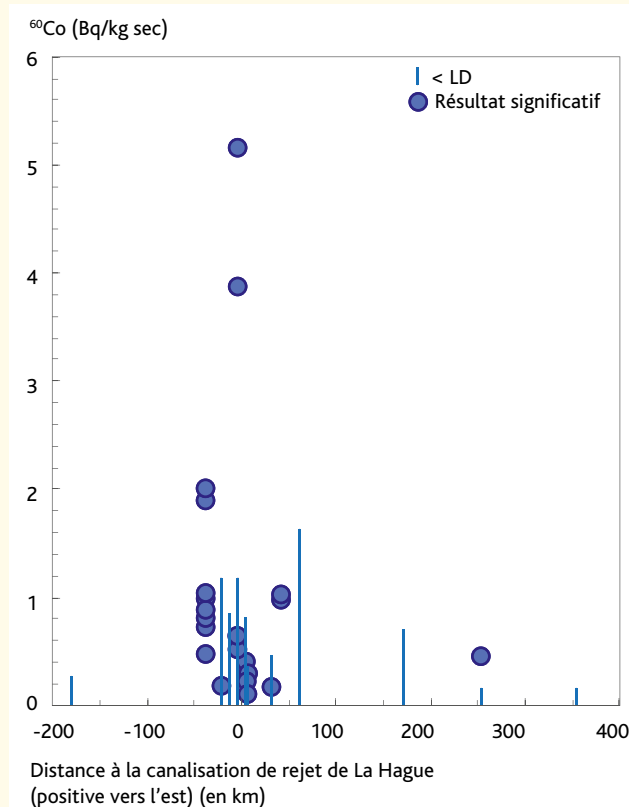
Flore aquatique marine

Les analyses réalisées sur les algues prélevées entre janvier 2011 et décembre 2012 révèlent la présence de produits de fission et d'activation (cobalt 60, iode 129) uniquement en Manche – mer du Nord avec des activités du même ordre de grandeur que les années antérieures récentes et fluctuantes selon les stations de prélèvement.

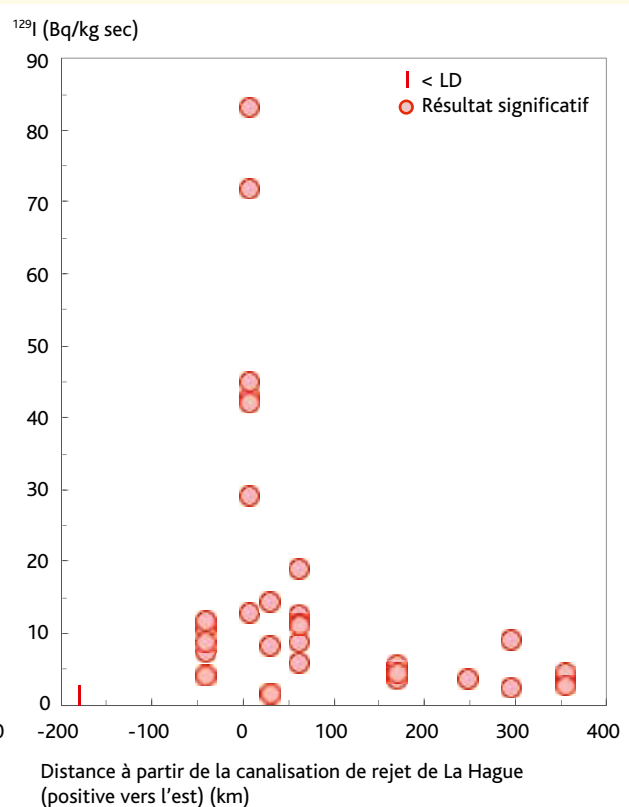
Comme observé dans les sédiments, les valeurs les plus élevées sont relevées sur les stations les plus proches de l'émissaire de rejet de La Hague, notamment au niveau du port de Goury, station de prélèvement située sous l'influence directe des rejets du site industriel de La Hague et pour laquelle les maxima sont généralement observés.

Bien que son activité ait diminué de plus d'un facteur 100 en vingt ans dans les rejets des installations nucléaires de La Hague, le cobalt 60 est, avec le césium 137, l'un des rares radionucléides artificiels émetteurs gamma pouvant être détectés dans le milieu marin aujourd'hui à l'ouest du Cotentin. Cette baisse des activités rejetées se traduit également dans les mesures réalisées. Entre 1988 et 1996, le niveau d'activité en cobalt 60 mesuré dans le fucus dentelé prélevé à l'anse des Moulinets a connu une diminution constante, passant d'une moyenne de 230 Bq/kg sec en 1988

■ Figure II.65 - Évolution de l'activité en cobalt 60 observée dans les sédiments marins prélevés entre janvier 2011 et décembre 2012 le long du littoral Manche – mer du Nord (Bq/kg sec).



■ Figure II.66 - Évolution de l'activité en iode 129 observée dans les algues prélevées entre janvier 2011 et décembre 2012 le long du littoral Manche – mer du Nord (Bq/kg sec).



à moins de 10 Bq/kg sec en 1996. À partir de 1997, le niveau d'activité a atteint un plateau (activités mesurées de l'ordre de 4 à 9 Bq/kg sec). En 2011-2012, les niveaux observés à la pointe de Goury confirment cette tendance. Ils fluctuent entre $0,58 \pm 0,16$ et $1,36 \pm 0,24$ Bq/kg sec. La mesure de ce radionucléide dans les algues s'explique essentiellement par les rejets des installations de traitement du combustible usé. Comparativement, la part attribuable aux centres nucléaires de production d'électricité est négligeable.

Le marquage des algues par les rejets des usines de La Hague et de Sellafield se retrouve distinctement dans les activités mesurées en iode 129 (figure II.66). Alors qu'elles sont inférieures à 3 Bq/kg sec à l'ouest de Roscoff, les activités mesurées de Carteret à Dunkerque atteignent jusqu'à 83 ± 11 Bq/kg sec à la pointe de Goury.

Faune aquatique marine

Mollusques

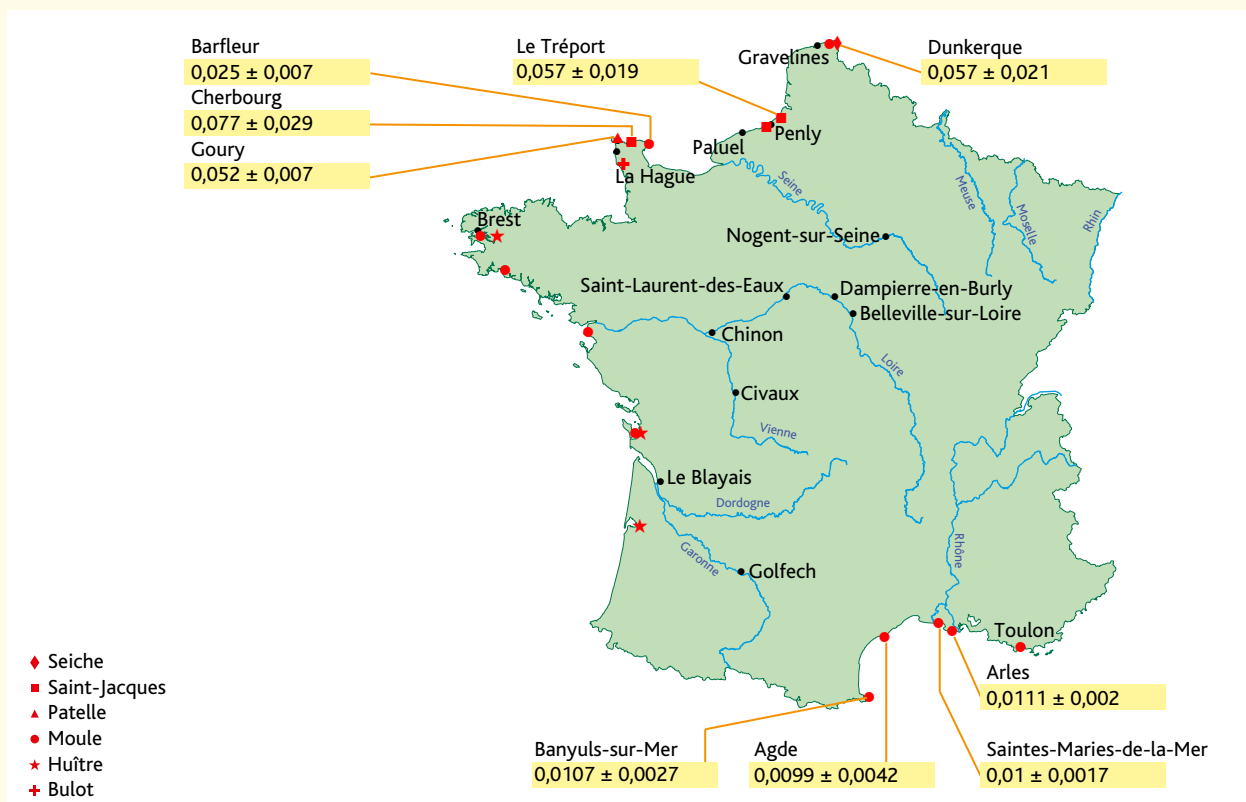
Sur la période d'analyse de ce bilan radiologique, la recherche de produits de fission et d'activation dans les mollusques (moules, patelles, huîtres, coquilles Saint-Jacques, seiches, bulots) a été menée sur l'ensemble du littoral français.

Les analyses mettent en évidence des traces de cobalt 60 en

Manche – mer du Nord et en Méditerranée dans la plupart des échantillons (figure II.67). Les niveaux relevés en Manche et en mer du Nord sont imputables aux rejets des usines de traitement des combustibles usés (La Hague, Sellafield) et dans une moindre mesure aux rejets des centres nucléaires de production d'électricité. Les activités en Méditerranée sont moindres qu'en Manche et mer du Nord (activités maximales de $0,077 \pm 0,029$ Bq/kg frais à Cherbourg et de $0,03 \pm 0,01$ Bq/kg frais aux Saintes-Maries-de-la-Mer). Le cobalt en Méditerranée provient essentiellement du drainage de la radioactivité rejetée par les installations nucléaires situées dans la vallée du Rhône.

Des traces d'iode 129 et d'argent 108 ont été mesurées à proximité immédiate de l'émissaire de rejet de l'usine de La Hague. L'iode 129 a été détecté dans des bulots prélevés le 21 juin 2011 à Barneville-Carteret (activité mesurée : $0,07 \pm 0,027$ Bq/kg frais). Les niveaux observés en argent 108 dans les patelles prélevées au port de Goury sont compris entre $0,012 \pm 0,008$ et $0,023 \pm 0,011$ Bq/kg de matière fraîche.

Figure II.67 - Moyenne pondérée des activités massiques en cobalt 60 dans les mollusques prélevés sur le littoral français (Bq/kg de matière fraîche).



Crustacés

Entre janvier 2011 et décembre 2012, des analyses radiologiques ont été réalisées sur des crustacés (tourteaux, araignées de mer, crevettes) pêchés le long des côtes Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord. Celles-ci révèlent la présence de radionucléides artificiels (cobalt 60, iode 129) à de faibles activités, dans certains échantillons de Manche et de mer du Nord, due essentiellement aux rejets liquides des usines de traitement de combustibles usés de La Hague et de Sellafield (figure II.68). La présence d'argent 110m dans les crevettes pêchées à Dunkerque est, quant à elle, essentiellement imputable aux rejets liquides du CNPE de Gravelines.

Poissons

Les résultats d'analyses effectués sur des poissons pêchés le long du littoral français métropolitain et outre-mer sont restés inférieurs aux limites de détection des appareils utilisés pour l'ensemble des produits de fission et d'activation recherchés autres que le césium.

En résumé

En 2012, aucun produit de fission et d'activation n'a été détecté dans les aérosols prélevés en routine par le réseau de surveillance de l'IRSN. En revanche, de l'iode 129 est régulièrement mesuré dans le lait et l'herbe prélevés à proximité du site de La Hague. En aval des installations nucléaires, les éléments régulièrement détectés dans l'eau des fleuves, les matières en suspension et les sédiments sont, par ordre d'activité décroissant : le cobalt 60, l'argent 110m, et le cobalt 58, plus rarement le manganèse 54. Dans l'eau de mer, outre ces mêmes radionucléides, de l'iode 129 est régulièrement mesuré à proximité de la canalisation de rejet de l'usine de retraitement de La Hague.

II.9 LES URANIUMS 234, 235 ET 238

Les isotopes de l'uranium

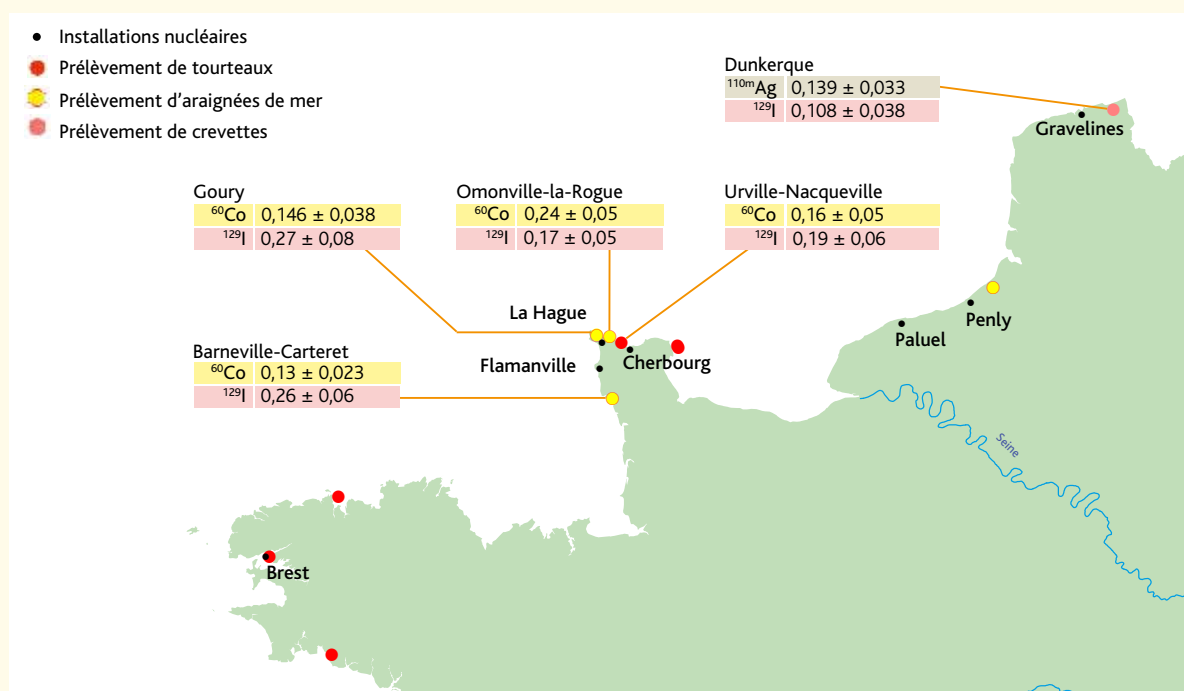
L'uranium comporte trois isotopes naturels radioactifs : l'uranium 238 (^{238}U), l'uranium 235 (^{235}U) et l'uranium 234 (^{234}U). L'uranium 238 est de loin l'isotope le plus abondant, (plus de 99 % en masse). Dans la nature, l'uranium 234, un des descendants radioactifs de l'uranium 238, est considéré en équilibre séculaire avec ce dernier, c'est-à-dire que les activités des deux radionucléides sont à peu près égales (tableau II.17). L'abondance en masse de l'uranium 235 (isotope fissile), qui représente 0,72 % dans la nature, atteint environ 4 % dans le combustible des réacteurs civils. On parle alors d'uranium enrichi.

Les sources de l'uranium

L'uranium mesuré dans les différentes composantes de l'environnement (sols, productions animales et végétales, eaux et sédiments des rivières) provient initialement des roches du sous-sol. Les concentrations en uranium varient fortement selon le type de roche. Les plus élevées sont généralement rencontrées dans les granites dont les activités massiques en uranium 238 sont de l'ordre 50 Bq/kg sec et parfois plus, comme dans le Massif central. À l'opposé, les roches volcaniques et sédimentaires sont globalement plus pauvres en uranium (15 Bq/kg sec environ).

De plus, l'uranium est essentiellement rejeté dans l'environnement par les sites de l'amont du cycle du combustible nucléaire, en charge de l'exploitation du minerai d'uranium

Figure II.68 - Moyenne pondérée des activités massiques dans les crustacés pêchés en Atlantique, Manche et mer du Nord (Bq/kg de matière fraîche).



et de la production du combustible nucléaire. Sur le territoire, il s'agit d'une part des anciens sites miniers, et d'autre part des usines qui purifient, convertissent et enrichissent l'uranium (sites Areva de Malvézi et Tricastin). Enfin, l'utilisation de l'uranium appauvri dans le domaine militaire, mais aussi la production et l'utilisation des engrais phosphatés, peuvent être à l'origine de renforcement local du bruit de fond naturel.

Les niveaux de l'uranium dans l'environnement

Les méthodes de mesure de l'uranium dans les matrices de l'environnement

Dans les matrices de l'environnement, la concentration peut être mesurée par la masse (spectrométrie de masse) ou par le rayonnement alpha (spectrométrie alpha) des différents isotopes. Avant la séparation radiochimique et l'analyse de l'uranium, les échantillons solides (sédiments et végétaux) sont incinérés puis dissous par attaque acide. La radiochimie permet l'extraction et la purification de l'uranium de la matrice qui le contient (eau, sols, végétaux, filtres aérosols) avant l'analyse.

Les sols

L'activité massique en uranium (en l'occurrence l'uranium 238, isotope majoritaire) mesurée dans les sols, de quelques Bq/kg à quelques centaines de Bq/kg sec, est dépendante de l'activité en uranium des différents types de roches, comme explicité précédemment. Dans les plaines alluviales, l'activité massique en uranium des sols est en moyenne de 40 Bq/kg sec.

En France, l'industrie de l'uranium s'est développée au lendemain de la seconde guerre mondiale. Elle a vécu son apogée au

cours des années 1980 pour décliner ensuite. La dernière mine d'uranium française a ainsi fermé ses portes en mai 2001. Les activités d'exploration, de production, de traitement et de stockage du minerai d'uranium ont concerné plus de 250 sites, répartis sur 25 départements (voir chapitre III.3). Ces activités ont parfois été à l'origine d'une modification de l'état radiologique de l'environnement naturel. Cette modification peut être significative du point de vue de la mesure sans forcément l'être du point de vue sanitaire.

Le milieu aquatique

Dans les sédiments des rivières et des fleuves, l'activité massique en uranium est comprise entre quelques Bq/kg sec et quelques centaines de Bq/kg sec avec une moyenne de l'ordre de 40 Bq/kg sec, comparable à celle des sols des plaines alluviales. Les valeurs les plus élevées sont observables dans les sédiments des cours d'eau qui drainent les zones granitiques les plus enrichies (jusqu'à 1 000 Bq/kg sec).

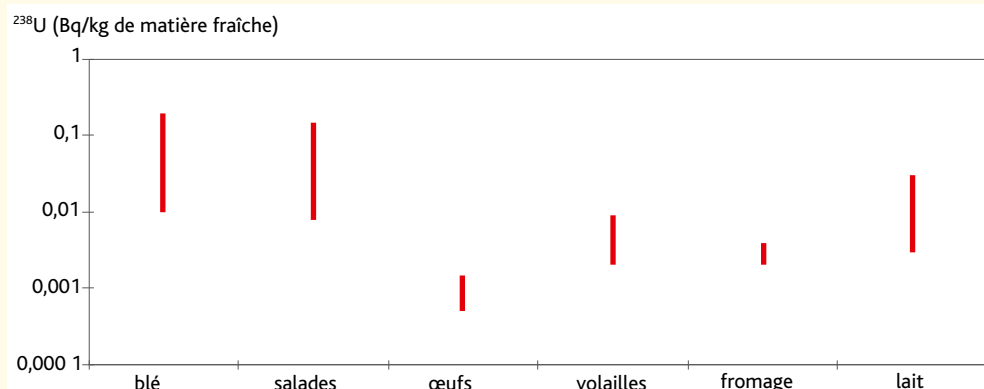
L'activité volumique en uranium dans les eaux de surface est très variable ; en effet, elle s'étend entre 0,0002 et 1,2 Bq/L. Cette limite peut être dépassée exceptionnellement, en certains points du territoire, en fonction de la géologie locale. Le fond géochimique en uranium des eaux de rivière est estimé à 0,005 Bq/L dans les zones sédimentaires et 0,002 Bq/L dans les zones de socle hercynien (le Massif central ou la Bretagne) et alpin. En comparaison, l'activité volumique en uranium dans l'eau de mer est un peu plus élevée et plus homogène, en moyenne de 0,04 Bq/L.

L'uranium dans la chaîne alimentaire

Très peu de mesures sont disponibles à ce jour concernant l'activité en uranium dans les denrées produites en dehors de l'influence des installations du cycle du combustible. L'activité

	Uranium 234	Uranium 235	Uranium 238
Période radioactive (ans)	2,5.10 ⁵	7,1.10 ⁸	4,5.10 ⁹
Abondance de l'isotope dans l'uranium naturel (% masse)	0,006	0,72	99,27
Activité de l'isotope par gramme d'uranium naturel (Bq/g)	13 110	575	12 346

■ **Tableau II.17**
Les isotopes de l'uranium naturel.



■ **Figure II.69**
Activité massique en uranium 238 dans les principales denrées produites en France (Bq/kg de matière fraîche).

en uranium dans la chaîne alimentaire varie fortement en fonction du type de matrice (matrices animales/matrices végétales) et d'une région à une autre. C'est dans les salades et le blé que les valeurs les plus élevées sont mesurées, de 0,01 à 0,2 Bq/kg de matière fraîche (figure II.69). L'activité en uranium des matrices végétales est influencée par le fond radiologique plus élevé dans les régions granitiques.

En comparaison, les productions animales (fromage, œufs et viande de volailles) témoignent d'une activité massique en uranium plus faible (de 0,03 à 0,002 Bq/kg de matière fraîche) que dans les végétaux.

L'uranium dans le compartiment aquatique continental

Données provenant des anciens sites miniers de la Crouzille et de l'Écarpière

Les principaux bassins-versants de l'ancienne zone minière de la Crouzille font l'objet d'une surveillance radiologique. Il s'agit du bassin-versant du Vincou qui comporte deux anciens sites miniers dont le site de la Crouzille, du bassin-versant du Ritord (cinq anciens sites) et de celui de la Gartempe (neuf anciens sites). Le Vincou et le Ritord sont deux affluents de la Gartempe (figure II.70).

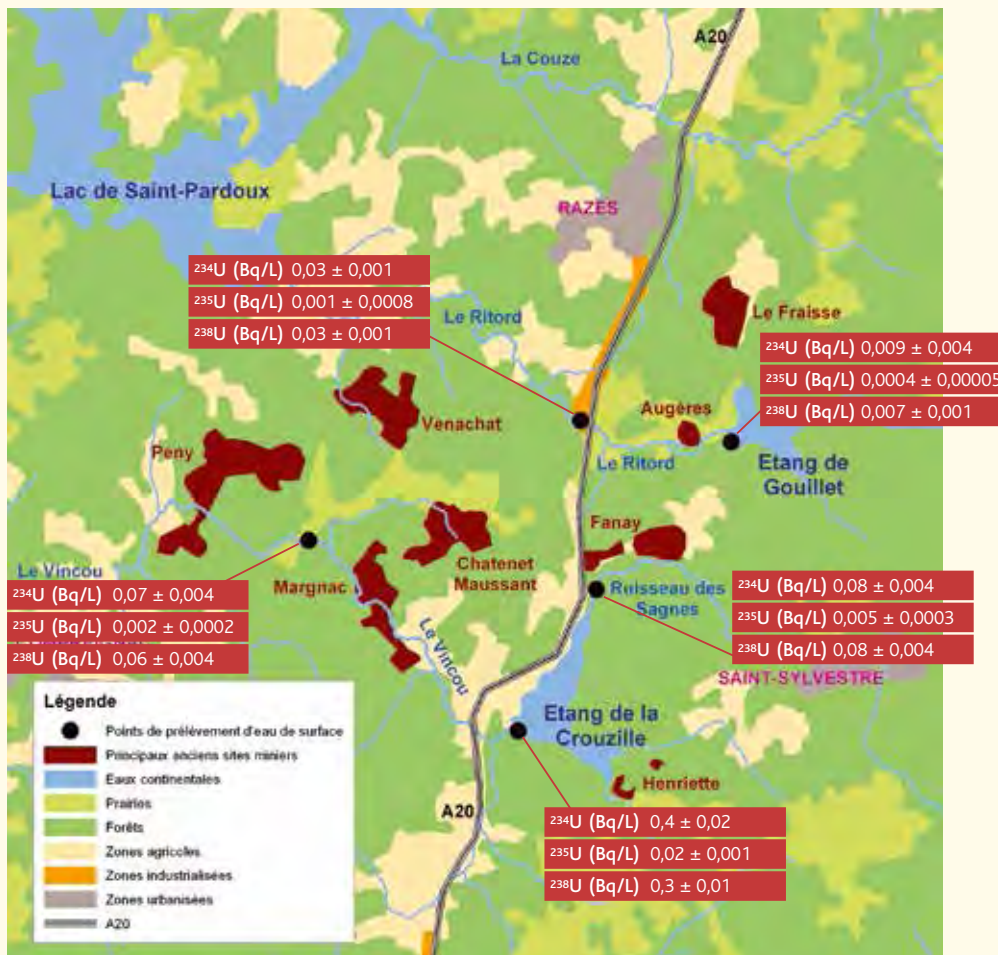


Figure II.70 - Cartes des points de prélèvements d'eau dans l'environnement des anciens sites miniers de la Crouzille et résultats des mesures pour 2011-2012.

Bassin-versant du Vincou

Dans l'étang de la Crouzille, l'activité volumique en uranium 238 est en moyenne de 0,08 Bq/L. Dans la rivière à l'aval de cet étang (le Vincou), l'activité de cet isotope est globalement plus élevée (en moyenne 0,3 Bq/L). Pour ce site de prélèvement, l'activité volumique atteint ponctuellement 1,1 Bq/L. Enfin, l'activité en uranium 238 la plus faible est mesurée plus à l'aval, sur la commune de Margnac (0,06 Bq/L en moyenne).

Bassin-versant du Ritord

Dans l'étang du Gouillet, l'activité volumique moyenne en uranium 238 est de 0,007 Bq/L, bien que des valeurs plus élevées soient parfois observées (jusqu'à 0,04 Bq/L). Dans le Ritord, le lot de mesures témoigne d'une activité volumique plus élevée (0,03 Bq/L, en moyenne).

La Gartempe et son bassin-versant

En aval du site Areva de Bessines-sur-Gartempe, dans la commune de Chateauponsac, l'activité volumique en uranium 238 de l'eau de la Gartempe est très homogène (en moyenne de 0,02 Bq/L). Ainsi, au sein du bassin versant de la Gartempe, c'est au niveau de la Crouzille et du Vincou que les activités volumiques des eaux de surface les plus élevées sont observées, supérieures à 0,1 Bq/L.

Les sites de Vendée, situés sur la commune de Gétigné (Loire-Atlantique), comprenaient une mine d'uranium souterraine et trois mines à ciel ouvert, ainsi qu'une usine de traitement du minerai. L'exploitation a débuté en 1954 et s'est achevée

en 1991. Dans le cadre du suivi de l'évolution de la radioactivité, des prélèvements d'eau de surface de deux rivières sont réalisés trimestriellement à l'aval de ces anciens sites miniers. La rivière située à l'aval de l'ancien site minier de l'Écarpière est la Moine. Cette rivière se jette dans la Sèvre Nantaise au niveau de Clisson. Un premier prélèvement d'eau de surface est réalisé dans la Moine à Gétigné, en aval immédiat du site de l'Écarpière. Le second prélèvement est effectué dans la Sèvre Nantaise à Gorges, en aval de la confluence avec la Moine. Dans la rivière qui draine l'ancien site minier de l'Écarpière (la Moine), l'activité moyenne volumique en uranium 238 est de 0,02 Bq/L. Plus à l'aval, l'activité volumique de cet isotope dans l'eau provenant de la Sèvre Nantaise est un peu plus faible et plus homogène (en moyenne 0,01 Bq/L).

Données provenant de l'environnement du site Areva de Malvési

Les eaux de surface

Le site Areva de Malvési est implanté à proximité de Narbonne (figure II.71), dans la vallée alluviale de l'Aude. Les parcelles agricoles sont parcourues par un réseau de canaux qui s'écoulent dans la plaine. Les prélèvements des eaux de surface ont été réalisés dans le canal de Tauran (est du site), à l'aval immédiat des rejets provenant du site Areva ainsi que dans la résurgence de l'Oeillal, située à l'amont des rejets (tableau II.18).

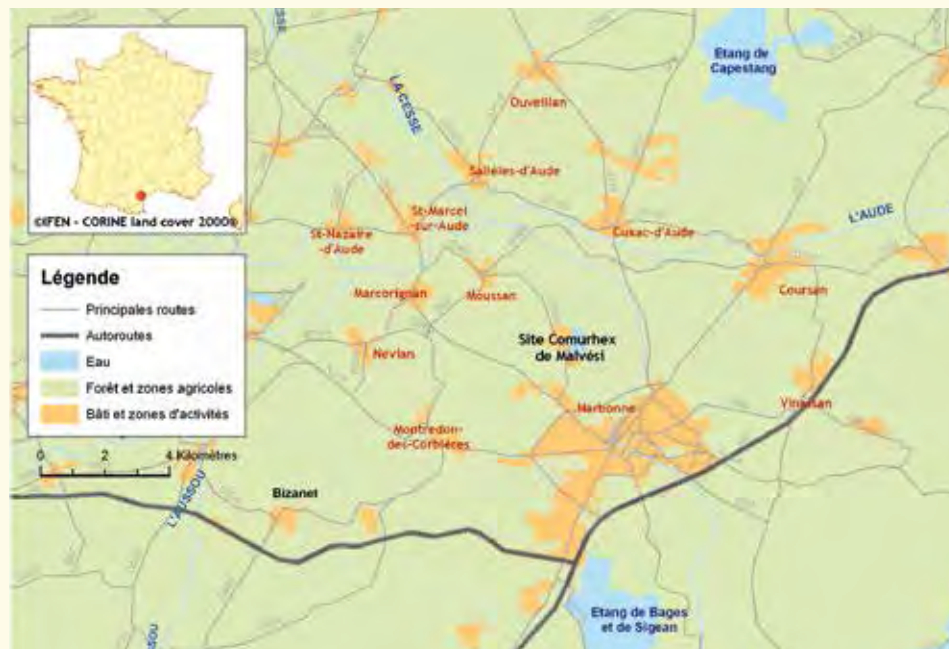


Figure II.71 - Situation géographique du site Areva de Malvési.

Tableau II.18 - Activités volumiques moyennes des isotopes de l'uranium dans les eaux de surface prélevées par l'IRSN dans l'environnement aquatique du site Areva de Malvési en 2011-2012 (Bq/L).

Localisation du prélèvement	Uranium 234 (Bq/L)	Uranium 235 (Bq/L)	Uranium 238 (Bq/L)
Canal du Tauran (aval rejet)	0,05 ± 0,01	0,002 ± 0,0015	0,04 ± 0,01
Résurgence de l'Oeillal (amont rejet)	0,03 ± 0,01	0,001 ± 0,0018	0,02 ± 0,01

À l'amont des rejets, les activités des isotopes de l'uranium sont faibles et peu variables, comprises, pour l'uranium 238, entre 0,01 et 0,02 Bq/L (résurgence de l'Oeillal). À l'aval des rejets, des activités plus élevées et plus variables en uranium 238 sont observées, comprises entre 0,01 et 0,15 Bq/L (canal de Tauran). Ainsi, les activités plus élevées observées ponctuellement dans le canal de Tauran témoignent de l'influence des rejets à l'aval immédiat du site Areva de Malvés (figure II.72).

Données provenant de l'environnement du site nucléaire de Tricastin

Les usines du site Areva du Tricastin assurent une partie des opérations industrielles permettant de transformer l'uranium issu des mines ou provenant de Malvés, en combustible pour les centrales nucléaires.

Implanté dans la plaine alluviale du Rhône entre Bollène et Pierrelatte, le site nucléaire du Tricastin (EDF, Areva et ses filiales) est bordé à l'est par le canal de Donzère-Mondragon, destiné à la régulation du débit du Rhône et à la navigation

fluviale. De plus, ce canal alimente en eau de refroidissement certaines installations nucléaires et collecte les rejets. Par ailleurs, le site Areva est parcouru du nord au sud par une petite rivière (la Gaffière) alimentée par le contre-canal. À l'aval du site, la Gaffière longe le lac Trop-Long avant de rejoindre la Mayre-Girarde pour former le Lauzon à l'aval. Les prélèvements d'eau de surface, de sédiments et de végétaux ont été effectués par l'IRSN dans ces différents cours d'eau.

Les eaux de surface

Les prélèvements des eaux de surface ont été réalisés dans l'environnement des sites du Tricastin à trois reprises (octobre 2011, juin et septembre 2012). L'activité volumique en uranium 238 des eaux de surface varie entre 0,01 et 0,04 Bq/L. Les prélèvements réalisés dans la Gaffière à l'aval des rejets témoignent des activités en uranium les plus élevées (moyenne de trois mesures : $0,03 \pm 0,002$ Bq/L) qui pourraient traduire un léger marquage de l'eau de la rivière par l'uranium provenant du site Areva du Tricastin. Ce niveau d'activité volumique est dans la continuité des observations réalisées au même point

Figure II.72 - Activité volumique en uranium 238 dans les eaux de surface prélevées en aval (canal de Tauran) et en amont (résurgence de l'Oeillal) des rejets du site Areva de Malvés en 2011-2012 (Bq/L).

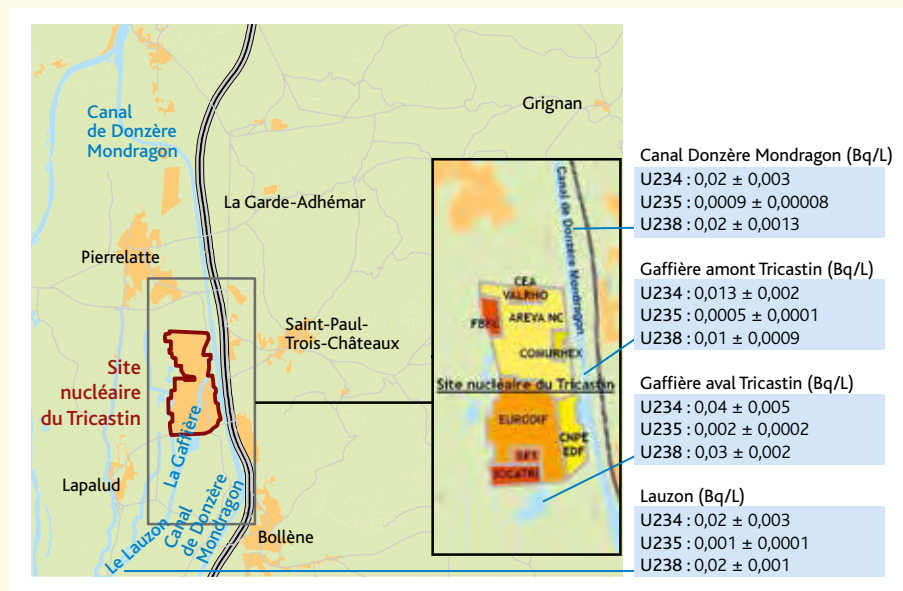
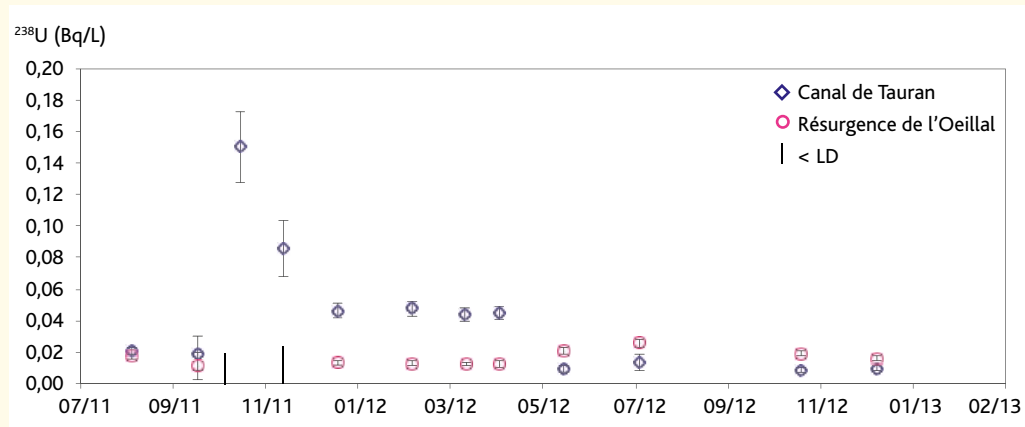


Figure II.73 - Cartographie de l'activité volumique moyenne en uraniums 234, 235 et 238 (moyenne des trois mesures correspondant à trois dates de prélèvements différentes) dans les eaux de surface prélevées dans l'environnement aquatique des sites nucléaires du Tricastin en 2011-2012 (Bq/L).

de prélèvement en 2010-2011 par l'IRSN (de 0,04 à 0,06 Bq/L en uranium 238). Plus à l'aval, dans le Lauzon, le marquage est moins évident (moyenne de trois mesures : $0,02 \pm 0,001$ Bq/L). À l'opposé, les activités en uranium les plus faibles sont observées dans la Gaffière, en amont des rejets, ainsi que dans le canal de Donzère-Mondragon. Les écarts qui sont observés d'un site de prélèvement à un autre sont reproduits aux trois dates de prélèvement. La figure II.73 présente les valeurs moyennes des mesures pour les trois dates de prélèvements effectués, pour les isotopes 234, 235 et 238 de l'uranium.

Les sédiments

Les sédiments ont été prélevés à deux reprises (en mai 2011 et en juin 2012) dans l'environnement aquatique des sites du Tricastin. Dans le canal de Donzère-Mondragon, par exemple, l'activité en uranium 238 est comprise entre 8 et 14 Bq/kg sec. Dans les sédiments provenant de la Gaffière à l'aval du site Areva, l'activité de cet isotope, un peu plus élevée que pour les autres points de prélèvement (entre 22 et 25 Bq/kg sec), se situe dans la continuité des mesures réalisées en ce point par l'IRSN

en 2010 (24 Bq/kg sec) et confirme le marquage des sédiments par l'uranium provenant du site (tableau II.19).

Les végétaux aquatiques

Des végétaux aquatiques ont été prélevés à deux reprises (en mai et en octobre 2011) dans le canal de Donzère-Mondragon et la Gaffière, en amont et en aval des sites nucléaires du Tricastin. Dans le canal, l'activité massique en uranium 238 observée à l'aval du site (6 à 8 Bq/kg sec) est comparable à celle de l'amont (8 à 9 Bq/kg sec). Dans la Gaffière, l'activité mesurée dans les végétaux prélevés à l'aval du site Areva (20 Bq/kg sec, en mai 2011) en comparaison de l'amont (15 Bq/kg sec à la même période) pourrait traduire un léger marquage des végétaux aquatiques de la rivière par l'uranium provenant du site Areva du Tricastin (tableau II.20).

Ainsi, les données acquises par l'IRSN dans l'environnement aquatique des sites nucléaires du Tricastin (eaux de surface, sédiments et végétaux) témoignent d'un léger marquage de la Gaffière par l'uranium provenant du site Areva.

■ **Tableau II.19** - Activités massiques moyennes des isotopes de l'uranium dans les sédiments prélevés par l'IRSN dans l'environnement aquatique des sites nucléaires du Tricastin en 2011 et 2012 (Bq/kg sec).

Localisation du prélèvement	Uranium 234 (Bq/kg sec)	Uranium 235 (Bq/kg sec)	Uranium 238 (Bq/kg sec)
Canal de Donzère-Mondragon amont Tricastin	13,4 ± 1,0	0,7 ± 0,1	13,4 ± 1,0
Canal de Donzère-Mondragon aval Tricastin	9,7 ± 0,7	0,5 ± 0,1	8,7 ± 0,7
Gaffière – amont Tricastin	12,1 ± 0,9	0,6 ± 0,1	11,4 ± 0,8
Gaffière – aval Tricastin	24,8 ± 1,7	1,3 ± 0,2	23,2 ± 1,6
Lauzon – aval Tricastin	11,1 ± 0,9	0,7 ± 0,1	10,9 ± 0,8

■ **Tableau II.20** - Activités massiques moyennes des isotopes de l'uranium dans les végétaux aquatiques prélevés dans l'environnement des sites nucléaires du Tricastin en 2011 et 2012 (Bq/kg sec).

Localisation du prélèvement	Uranium 234 (Bq/kg sec)	Uranium 235 (Bq/kg sec)	Uranium 238 (Bq/kg sec)
Canal de Donzère-Mondragon amont Tricastin	6,7 ± 0,5	0,4 ± 0,05	6,5 ± 0,4
Canal de Donzère-Mondragon aval Tricastin	9,0 ± 0,6	0,6 ± 0,07	8,5 ± 0,6
Gaffière – amont Tricastin	4,9 ± 0,4	0,5 ± 0,05	4,9 ± 0,4
Gaffière – aval Tricastin	9,6 ± 0,6	0,8 ± 0,07	7,4 ± 0,6

Données provenant de l'environnement des sites CEA de Bruyères-le-Châtel et de Saclay

Le site CEA de Bruyères-le-Châtel est localisé dans le bassin-versant de l'Orge, un des affluents de la Seine. Des prélèvements de sédiments ont été réalisés en 2011 et 2012 dans deux rivières situées à l'aval de ce site (La Rémarde et Le Grand Rué).

Aux deux points de prélèvement, l'activité massique des isotopes de l'uranium dans les sédiments est globalement faible et ne met pas en évidence de marquage consécutif aux rejets en uranium actuels ou passés provenant du site.

Le site CEA de Saclay est localisé dans le bassin-versant de l'Yvette, un affluent de l'Orge. Des prélèvements d'eaux de surface sont réalisés mensuellement dans l'aqueduc des Mineurs qui est l'exutoire des rejets des installations du site. Plus à l'aval, les eaux du ruisseau de Vauhalla et de l'Yvette font aussi l'objet de prélèvements et de mesures (tableau II.21).

À l'aval du site (aqueduc des Mineurs), l'activité volumique des isotopes de l'uranium dans les eaux est globalement faible (activité en uranium 238 inférieure à 0,01 Bq/L) et ne met pas en évidence de marquage consécutif aux rejets en uranium actuels ou passés provenant du site (figure II.74). Des activités comparables sont observées plus à l'aval, dans le ruisseau de Vauhalla. L'activité volumique en uranium 238 de l'eau prélevée dans l'Yvette est comprise entre 0,01 et 0,02 Bq/L.

L'uranium dans le compartiment terrestre

Données provenant de l'environnement du site Areva de Malvési

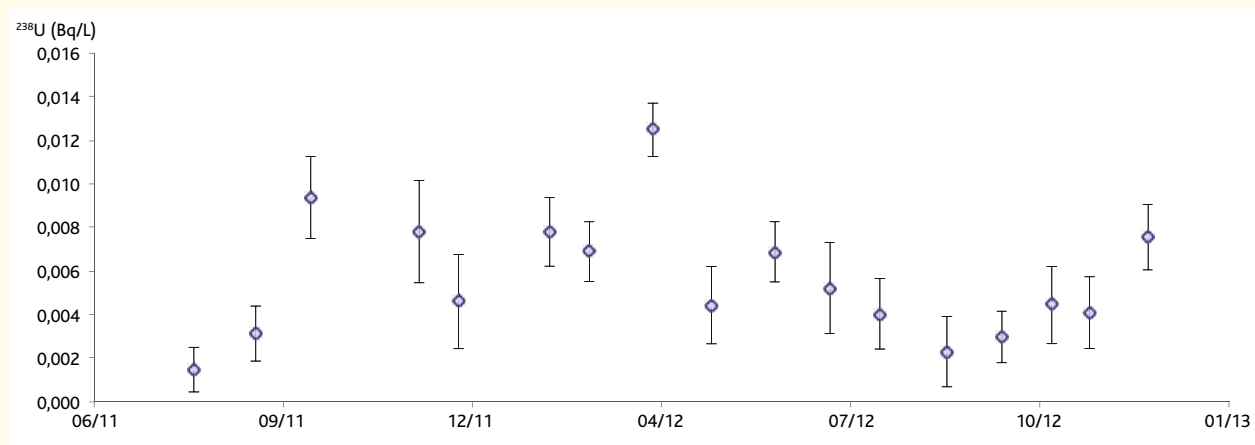
Des prélèvements de feuilles de cyprès sont réalisés au nord (lieu dit « L'Oeillal ») et au sud du site Areva de Malvési (Livière Basse), à plusieurs reprises en 2011 et 2012. À cette période, d'autres matrices végétales (aiguilles de pin et herbe de prairie) sont prélevées à l'ouest (les Almérats Hauts) et à l'est du site (Tauran), respectivement (figures II.75 et 76).

Les activités les plus élevées sont observées dans les végétaux prélevés à l'est et à l'ouest du site, sous les vents dominants provenant du site Areva (activité massique en uranium 238 > 10 Bq/kg sec). Les prélèvements réalisés au nord du site révèlent également des activités élevées (uranium 238 compris entre 5,1 et 6,9 Bq/kg sec à l'Oeillal). En comparaison, les activités les plus basses et les plus homogènes sont observées dans les végétaux de Livière Basse (uranium 238 compris entre 0,9 et 1,9 Bq/kg sec). Ainsi, les activités mesurées dans les végétaux terrestres témoignent de l'influence (plus ou moins marquée d'un site de prélèvement à l'autre) des rejets d'uranium provenant du site Areva de Malvési.

■ **Tableau II.21** - Activités volumiques moyennes des isotopes de l'uranium dans les eaux de surface prélevées par l'IRSN dans l'environnement aquatique du site CEA de Saclay en 2011 et 2012 (Bq/L).

Localisation du prélèvement	Uranium 234 (Bq/L)	Uranium 235 (Bq/L)	Uranium 238 (Bq/L)
Aqueduc des Mineurs	0,008 ± 0,003	0,0003 ± 0,0001	0,006 ± 0,002
Ruisseau de Vauhalla	0,009 ± 0,003	0,0003 ± 0,0001	0,007 ± 0,002
L'Yvette	0,020 ± 0,003	0,0007 ± 0,0001	0,014 ± 0,002

■ **Figure II.74** - Activités volumiques en uranium 238 dans les eaux de surface prélevées dans l'aqueduc des Mineurs, en aval du centre CEA de Saclay en 2011-2012 (Bq/L).



En résumé

Compte tenu de l'origine naturelle de l'uranium, les activités en uranium mesurées dans les sols varient avec la nature des roches qui les supportent. De même, dans les sédiments des rivières et des fleuves, les valeurs les plus élevées sont observées dans les sédiments des cours d'eau qui drainent les zones granitiques riches en uranium. Dans la chaîne alimentaire, l'activité en uranium varie fortement en fonction du type de matrice (végétale ou animale) et d'une région à l'autre. Certaines installations nucléaires de l'amont du cycle du combustible (anciens sites miniers, Malvésí, Tricastin) marquent leur environnement par des rejets anciens ou récents liés à leurs activités.

Figure II.75 - Localisation des points de prélèvement des végétaux terrestres dans l'environnement du site Areva de Malvésí.

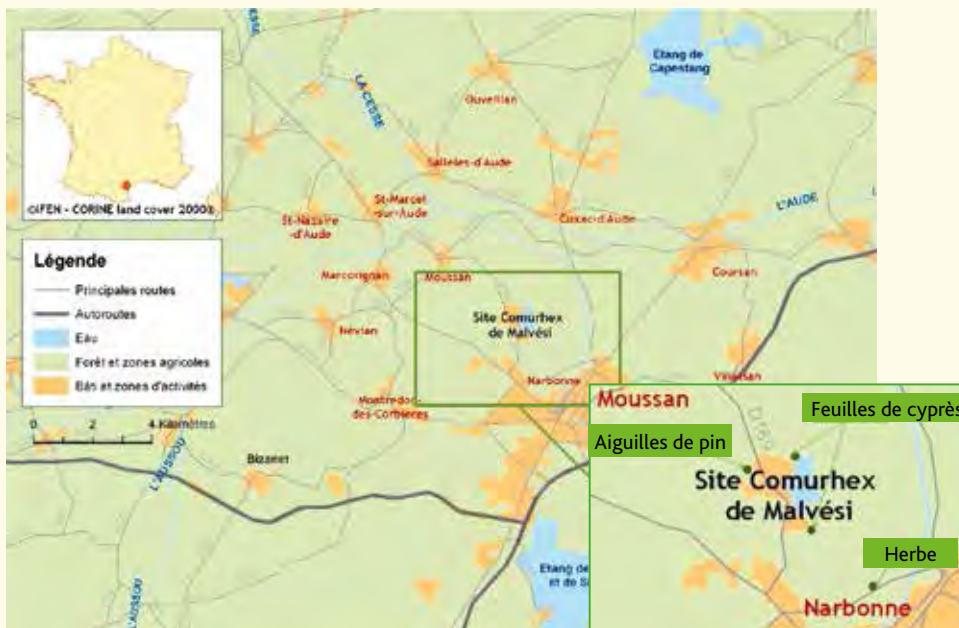
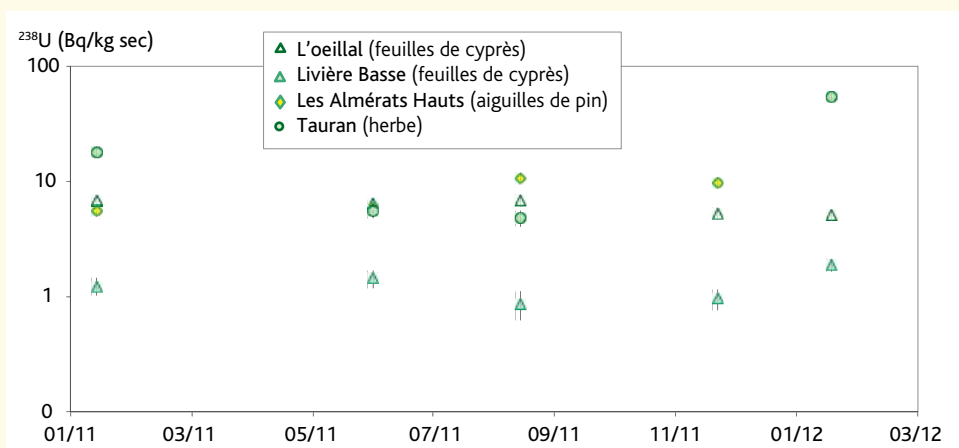


Figure II.76 - Activités massiques en uranium ^{238}U dans les végétaux prélevés dans l'environnement terrestre du site Areva de Malvésí en 2011-2012 (Bq/kg sec).



II.10 LES TRANSURANIENS (Am, Pu)

Généralités

Les transuraniens sont des radioéléments artificiels présents dans l'environnement à l'état de traces. Il s'agit des isotopes du plutonium (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu et ^{241}Pu), de l'américium 241 et des isotopes du neptunium et du curium. La plupart d'entre eux sont des produits d'activation de l'uranium ou du plutonium. D'autres transuraniens sont des isotopes radiogéniques, comme l'américium 241, de période radioactive 14 ans, issu de la désintégration du plutonium 241.

Les transuraniens mesurés dans l'environnement proviennent presque exclusivement des essais nucléaires effectués dans l'atmosphère, entre 1950 et 1980. À cette source s'ajoute la chute du SNAP-9A en 1964 (satellite alimenté par des générateurs contenant du plutonium), à l'origine de la dissémination de plutonium 238 dans l'atmosphère de l'hémisphère sud. Les dépôts des particules radioactives disséminées sur l'ensemble du globe par les circulations atmosphériques (on parle de « retombées globales ») ont touché notre environnement terrestre et aquatique.

Certaines usines du cycle du combustible (centres de retraitement du combustible et usines de conversion de l'uranium) ainsi que certains centres d'études sont également à l'origine de rejets de plutonium qui marquent discrètement l'environnement proche de ces sites. Les principales sources de transuraniens, à savoir les retombées atmosphériques globales, les rejets des usines du cycle du combustible (rejets liquides de La Hague en 2012 : 19,7 GBq, 1,7 MBq dans les rejets gazeux) et des centres de recherches (rejets liquides du CEA Marcoule en 2012 : 1,3 GBq, 1,3 MBq dans les rejets gazeux) sont discriminées dans l'environnement par la mesure des rapports des isotopes du plutonium et de l'américium (plutonium 238/plutonium 239+240 ; plutonium 240/plutonium 239 ; américium 241/plutonium 239+240). Les niveaux de concentrations mesurés, en général variables jusqu'à plusieurs ordres de grandeurs, ont moins d'intérêt que la connaissance de ces rapports isotopiques qui signent l'origine des transuraniens (tableau II.22).

Parmi les radionucléides artificiels, les transuraniens présentent généralement les concentrations les plus faibles dans l'environnement.

Les actinides transuraniens ont une forte propension à réagir avec les sols et les matières en suspension, bien que l'intensité de leur rétention soit très variable selon l'élément (plutonium ou américium, par exemple) et les conditions physico-chimiques (changement de leurs états d'oxydation selon le pH et l'état d'oxydoréduction du milieu). Ainsi, les sols et sédiments constituent-ils le lieu de stockage préférentiel et la (très faible) source secondaire de ces radioéléments, alors que leurs concentrations dans les compartiments biotiques (végétaux et animaux) sont généralement très basses, avec des transferts parmi les plus faibles dans les chaînes alimentaires. Dans les eaux douces, ils peuvent s'associer aux colloïdes par lesquels ils sont transportés.

Dans les sols, l'activité surfacique en plutonium 239+240 est de l'ordre de 50-100 Bq/m² dans les zones de plaine et peut atteindre 200 Bq/m² dans les zones montagneuses et les zones humides du territoire, où les dépôts atmosphériques sous forme de pluie ou de neige ont prédominé. Ces dépôts, qui ont peu migré en profondeur, correspondent à des activités massiques en plutonium de quelques centaines de mBq/kg de sol sec. Les activités des transuraniens dans les végétaux sont particulièrement faibles car ces radioéléments présentent des taux de transfert aux plantes peu élevés. Dans les légumes feuilles et les céréales par exemple, l'activité massique en plutonium 239+240 est comprise entre 0,1 et 1 mBq/kg de matière fraîche, voire souvent inférieure à la limite de détection.

Les techniques de mesure des transuraniens

Pour la détermination des activités en transuraniens, plusieurs méthodes de mesure peuvent être utilisées :

- la spectrométrie gamma à bas bruit de fond permet de détecter l'américium 241 (émetteur α et γ) ;
- la spectrométrie alpha (précédée d'une minéralisation et d'une séparation radiochimique) permet habituellement de mesurer l'américium 241, le plutonium 238 et le plutonium 239+240 (sans discrimination des isotopes 239 et 240) et une limite de détection pour des masses d'échantillon usuelles, de l'ordre de 0,1 mBq dans l'échantillon (figure II.77, page 105) ;
- la spectrométrie de masse (précédée d'une minéralisation) permet de mesurer chacun des isotopes séparément avec une très bonne précision.

La spectrométrie alpha et la spectrométrie de masse impliquent généralement des traitements chimiques préalables. Elles sont généralement réservées à des études particulières, sur un nombre limité d'échantillons.

Les transuraniens dans le compartiment terrestre

Flore terrestre

Les transuraniens sont recherchés dans les herbes prélevées semestriellement sous les vents principaux et secondaires des sites du Tricastin et de Marcoule. Sur la période considérée pour l'étude de ce bilan radiologique, seules quelques traces ont été mesurées à des activités proches des limites de détection (activité en plutonium 239+240 mesurée à Saint-Étienne-des-Sorts, sous les vents secondaires de Marcoule, de $0,0046 \pm 0,004$ Bq/kg sec en mai 2011 ; activité en américium 241 mesurée à Pierrelatte, sous les vents secondaires du site du Tricastin, de $0,008 \pm 0,006$ Bq/kg sec en mai 2011). Ces faibles activités s'apparentent au reliquat imputable aux tirs d'essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère.

Céréales

Les résultats d'analyses effectuées sur quelques échantillons de blé récoltés en 2011 dans différentes régions françaises sont restés inférieurs aux limites de détection des méthodes

d'analyses utilisées. De même, le riz de Camargue prélevé en aval lointain du centre de retraitement de Marcoule, susceptible de rejeter des transuraniens dans l'eau du Rhône, ne présentait en 2011 aucune trace de transuraniens.

Fruits

Les analyses réalisées dans des fruits (mangue, litchis, ananas) récoltés début 2011 sur l'île de la Réunion n'ont pas permis de mettre en évidence la présence de transuraniens dans ces denrées.

Les transuraniens dans le compartiment aquatique continental

Les isotopes 238, 239 et 240 du plutonium sont exclusivement rejetés par les centres de retraitement du combustible irradié (Marcoule et La Hague). Ils sont détectés dans l'ensemble des sédiments des cours d'eau français car ils sont introduits dans les eaux des cours d'eau *via* les eaux de drainage des sols marqués par les retombées atmosphériques globales. Dans le Rhône, les activités retrouvées peuvent être plus importantes en raison de l'apport de ces radionucléides par les effluents du site de Marcoule.

Eau de surface

Les analyses réalisées ponctuellement dans les eaux des grands fleuves (Seine, Loire, Rhin, Rhône) et rivières françaises (Moselle, Gironde, Durance) n'ont pas permis de mesurer d'activités significatives pour les isotopes du plutonium.

Matières en suspension et sédiments (hors vallée du Rhône)

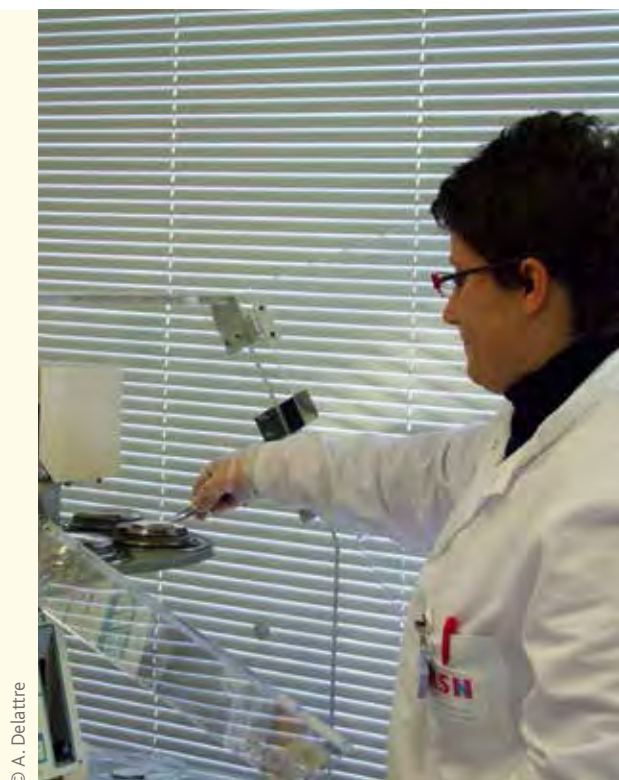
Les mesures réalisées sur les matières en suspension prélevées en aval proche (Blayais, Cattenom, Fessenheim) ou lointain (au niveau des Ponts-de-Cé en aval hydraulique des installations nucléaires du bassin versant de la Loire) de certains centres de production d'électricité témoignent des niveaux moyens observés dans les cours d'eau français en raison de la rémanence due aux retombées anciennes (les transuraniens ne sont pas rejetés par ces installations en fonctionnement normal). Les activités maximales observées sur ces matrices, entre janvier 2011 et décembre 2012, sont de $0,33 \pm 0,11$ Bq/kg sec pour l'américium 241 (prélèvement mensuel d'août 2011 aux Ponts-de-Cé) et de $0,37 \pm 0,13$ Bq/kg sec pour les isotopes 239 et 240 du plutonium (prélèvement mensuel d'août 2011 en aval du CNPE du Blayais). Le plutonium 238 n'a été mesuré que sur le prélèvement de février 2011 en aval du CNPE du Blayais (activité : $0,18 \pm 0,08$ Bq/kg sec).

Les transuraniens sont régulièrement recherchés dans les sédiments des cours d'eau situés à proximité des sites de Cadarache, Saclay, Bruyères-le-Château et La Hague. Pour ces trois derniers sites, les activités en plutonium 239+240 mesurées sont souvent supérieures, d'un à deux ordres de grandeur, aux niveaux habituellement observés dans les cours d'eau français situés hors influence potentielle des rejets d'installations nucléaires (*figure II.78, page 106*). En effet, une étude récemment lancée par l'IRSN dans le grand quart sud-ouest de la France a montré que les niveaux maximaux relevés en plutonium 239+240 dans les sédiments du milieu dulçaquicole prélevés entre 2009 et 2011, hors influence de toute installation nucléaire, étaient de l'ordre de $0,27 \pm 0,09$ Bq/kg de matière sèche (prélèvement réalisé le 22 juin 2010 dans la

■ **Tableau II.22** - Rapport d'activités plutonium 238/ plutonium 239+240, traceur des origines de la contamination.

Origine de la contamination	Rapport $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ généralement observé
Retombées globales	0,03
Rejets industriels	0,1 à 1

■ **Figure II.77** - Échantillon préparé déposé sur un appareil de spectrométrie alpha (chambre à grille).



© A. Delattre

Vienne en amont de la centrale de Civaux, au niveau de la commune de Mazerolles (86). Le plutonium 238 et l'américium 241 n'ont pas été détectés sur l'ensemble des prélèvements effectués sur ce territoire.

La présence de radionucléides transuraniens dans les cours d'eau situés à proximité des installations de Bruyères-le-Châtel et de Saclay est imputable aux rejets d'effluents liquides passés de ces sites. Les activités en américium et en plutonium relevées dans les ruisseaux de la Sainte-Hélène et dans le bassin des Moulinets suggèrent un léger marquage par les rejets du site de La Hague : le rapport d'activités plutonium 238/plutonium 239+240, de l'ordre de 0,65 en moyenne, est caractéristique du combustible usé civil (le rapport représentatif des retombées atmosphériques des tirs d'armes des années 1960 est de l'ordre de 0,03). L'ensemble des résultats d'analyses effectuées en 2011 et 2012 sont présentés dans le tableau II.23.

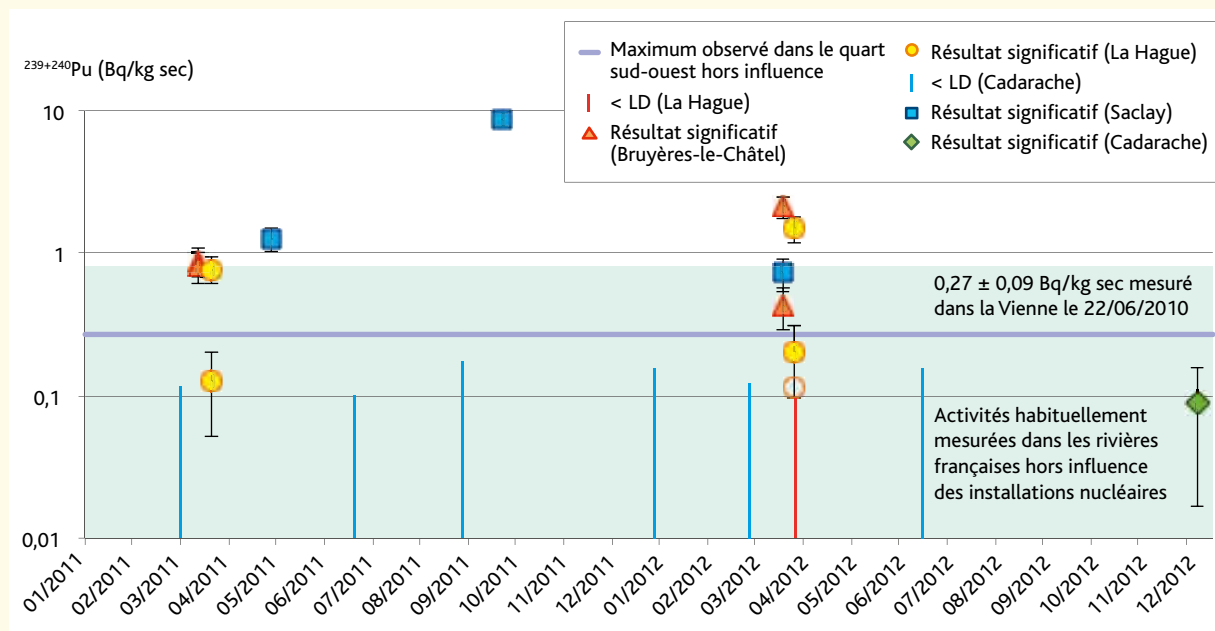
Matières en suspension et sédiments du bassin rhodanien

L'américium et les isotopes du plutonium mesurés dans le Rhône sont introduits via les eaux de drainage des sols marqués par les retombées atmosphériques globales, et par les effluents du centre de retraitement de Marcoule. Les analyses réalisées sur les sédiments mettent en évidence un marquage du Rhône aval par les transuraniens : les activités mesurées en aval hydraulique des rejets du site de Marcoule sont significativement plus élevées que celles relevées en amont (figure II.79). Les sédiments prélevés à Saint-Étienne-des-Sorts, en amont hydraulique de Marcoule, présentent des activités en américium 241 et en plutonium 239+240 de l'ordre de $0,096 \pm 0,037$ Bq/kg sec et de $0,122 \pm 0,047$ Bq/kg sec en moyenne respectivement. Ces niveaux atteignent des valeurs maximales de $4,7 \pm 0,6$ Bq/kg sec pour l'américium 241 et de $3,4 \pm 0,5$ Bq/kg sec pour le plutonium 239+240 le 6 juin

Tableau II.23 - Activités moyennes mesurées en transuraniens dans les sédiments du milieu dulçaquicole prélevés dans certains cours d'eau français (Bq/kg sec).

Site surveillé	Milieu surveillé	Activités mesurées (Bq/kg sec)		
		²⁴¹ Am	²³⁸ Pu	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
Site de La Hague	Ruisseau des Landes	< 0,13	< 0,11	< 0,11
	Bassin des Moulinets	$0,41 \pm 0,08$	$0,34 \pm 0,09$	$0,95 \pm 0,15$
	Ruisseau Sainte-Hélène	$0,125 \pm 0,045$	$0,1 \pm 0,05$	$0,15 \pm 0,06$
CEA Bruyères-le-Châtel	Ruisseau le Grand Rué	$0,18 \pm 0,06$	$0,114 \pm 0,049$	$1,15 \pm 0,18$
	La Rémarde	$0,086 \pm 0,037$	< 0,13	$0,55 \pm 0,12$
CEA Cadarache	La Durance	$0,107 \pm 0,022$	< 0,13	$0,122 \pm 0,025$
CEA Saclay	Aqueduc des mineurs	$0,25 \pm 0,06$	$0,24 \pm 0,06$	$1,12 \pm 0,15$

Figure II.78 - Activités en plutonium 239+240 mesurées dans les sédiments prélevés à proximité des sites de Cadarache, Saclay, Bruyères-le-Châtel et La Hague entre janvier 2011 et décembre 2012 (Bq/kg sec).



2012 à Codolet, en aval direct de l'émissaire de rejet du site de Marcoule. Le rapport d'activité plutonium 238/plutonium 239+240, de l'ordre de 0,38 en moyenne en aval du site de Marcoule, témoigne de l'origine industrielle des radionucléides mesurés. La présence de transuraniens dans le Rhône aval est imputable en partie aux rejets passés et actuels du centre de retraitement de Marcoule : soulignons notamment que les rejets de Marcoule ont marqué significativement le Rhône aval en isotopes du plutonium, notamment jusqu'en 1997, année de la mise en démantèlement du centre de retraitement du combustible irradié.

Flore aquatique continentale

Les roseaux prélevés annuellement dans l'aqueduc des Mineurs, en aval de la canalisation de rejet des effluents liquides du CEA Saclay, témoignent d'un marquage résiduel dû aux rejets passés du centre d'études : des traces d'américium, d'isotopes du plutonium se retrouvent dans les végétaux aquatiques (tableau II.24).

Comme pour les sédiments, les analyses opérées sur les végétaux aquatiques prélevés dans le Rhône, de Pierrelatte (26) à Codolet (30), mettent en évidence un marquage en transuraniens en aval direct du centre de retraitement de Marcoule induit par ses rejets d'effluents liquides autorisés (figure II.80).

Figure II.79 - Activités massiques observées en américium 241 en 2011 et 2012 sur les matières en suspension et les sédiments prélevés dans le Rhône, en aval de Montélimar (26) (Bq/kg sec).

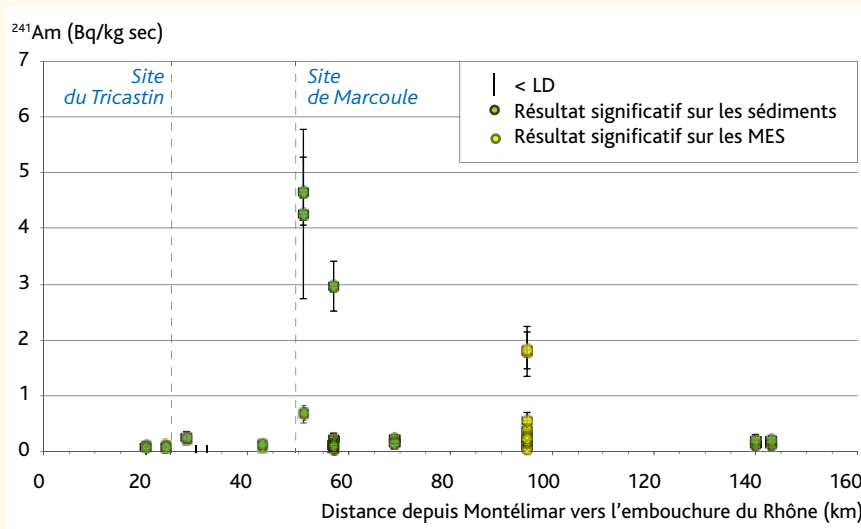
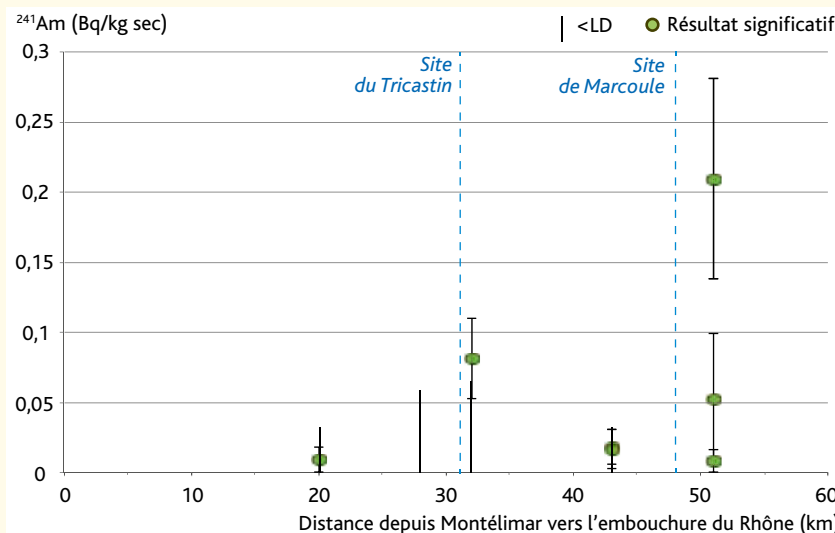


Tableau II.24 - Activités mesurées dans les roseaux prélevés le 28 septembre 2011 au niveau de l'aqueduc des Mineurs via lequel transitent les rejets d'effluents liquides du centre de Saclay (Bq/kg sec).

Radionucléide	Activité (Bq/kg sec)
²⁴¹ Am	0,011 ± 0,007
²³⁸ Pu	0,019 ± 0,007
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	0,035 ± 0,009

Figure II.80 - Activités massiques observées en américium 241 en 2011 et 2012 dans les végétaux aquatiques prélevés dans le Rhône, en aval de Montélimar (26) (Bq/kg sec).



Les transuraniens dans le compartiment aquatique marin

Dans le milieu marin, le plutonium et l'américium proviennent des retombées des essais nucléaires atmosphériques et des rejets des installations nucléaires. Actuellement, les rejets les plus significatifs proviennent des usines de retraitement du combustible usé de La Hague et de Sellafield en Angleterre, qui sont à l'origine d'un léger marquage en Manche et en mer du Nord. L'ensemble des résultats d'analyses effectuées est rassemblé dans le tableau II.25.

Matières en suspension et sédiments

Le plutonium montre une très forte affinité pour les particules sédimentaires, faisant de ces matrices de bons indicateurs des contaminations passées et présentes. Des coefficients de partition de l'ordre de $10^5 - 10^6$ L/kg ont été souvent rapportés dans l'eau libre.

L'influence des rejets passés et actuels des usines de La Hague et de Sellafield est mise en évidence sur les analyses réalisées en 2011 et 2012 sur les matières en suspension collectées en aval direct des rejets des CNPE de Paluel, Penly et Gravelines (à noter que ces installations ne rejettent pas de transuraniens

dans l'environnement) : les activités mesurées en plutonium $^{239+240}$ fluctuent entre $0,16 \pm 0,09$ (prélèvement d'août 2012 à Paluel) et $1,27 \pm 0,24$ Bq/kg de matière sèche (prélèvement d'août 2012 à Gravelines).

À titre de comparaison, au début des années 1990, les concentrations en plutonium $^{239+240}$ dans les matières en suspension dans l'eau de mer étaient comprises entre 1 et 10 Bq/kg sec en Manche ; en mer d'Irlande, elles décroissaient exponentiellement vers le nord, passant de quelques milliers de Bq/kg sec à proximité de l'émissaire de l'usine de Sellafield à quelques dizaines de Bq/kg sec à 200 kilomètres au nord de l'émissaire.

Des sédiments marins (vase, sable de plage) ont été prélevés courant 2011 et 2012 en différentes stations situées le long du littoral méditerranéen, Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord. L'analyse de ces sédiments révèle la présence de transuraniens (américium 241, plutonium 238 et plutonium $^{239+240}$) en Manche et en mer du Nord liée principalement aux rejets d'effluents liquides passés et présents des installations du site de La Hague, auxquels viennent s'ajouter les rejets liquides du site de Sellafield en Angleterre. Les niveaux relevés en Méditerranée et dans l'Atlantique résultent de la rémanence due aux tirs des essais nucléaires dans l'atmosphère.

■ **Tableau II.25** - Activités moyennes en transuraniens mesurées le long des côtes de la Méditerranée, de l'Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord dans les différents échantillons prélevés entre janvier 2011 et décembre 2012.

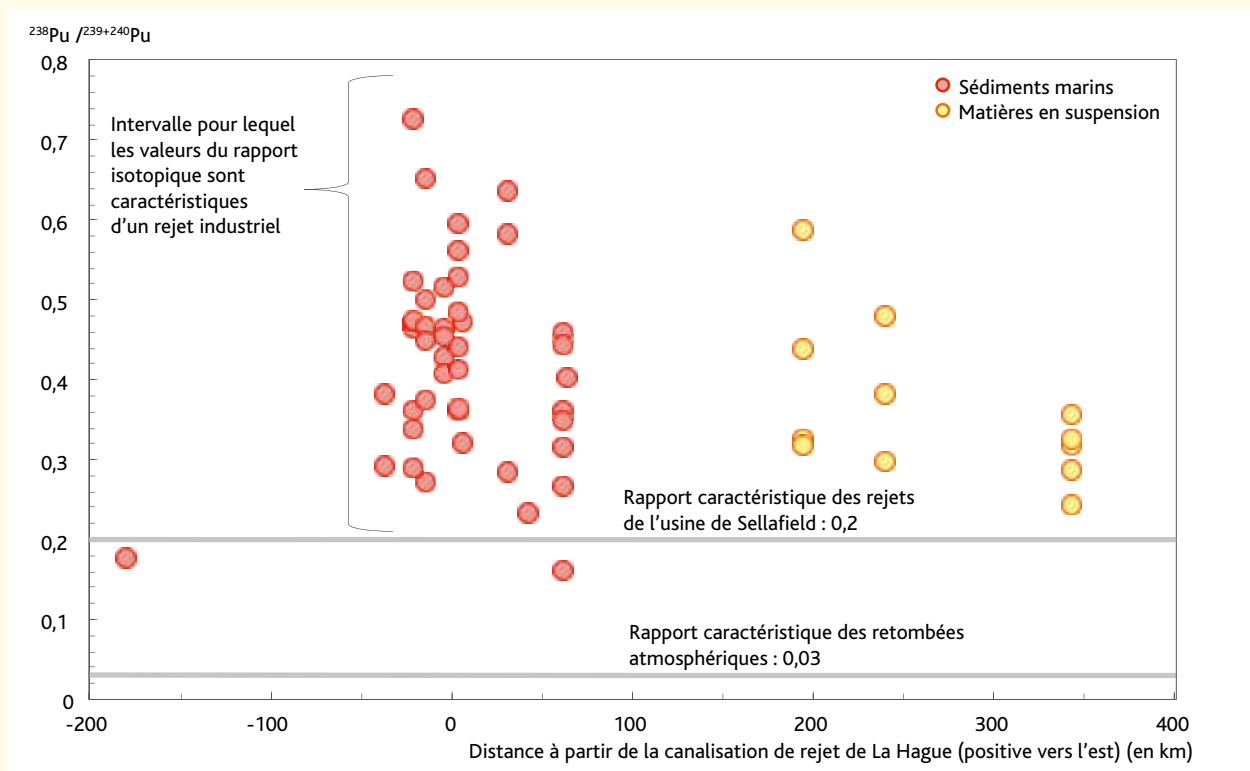
Matrices	Radio-nucléide recherché	Activités massiques moyennes			
		Méditerranée	Atlantique	Manche mer du Nord	Manche proche site de La Hague (de Carteret à Barfleur)
Sédiments marins (Bq/kg sec)	^{241}Am	< 0,12	$0,113 \pm 0,029$	$0,349 \pm 0,015$	$0,453 \pm 0,018$
	^{238}Pu	< 0,11	< 0,12	$0,147 \pm 0,011$	$0,158 \pm 0,013$
	$^{239+240}\text{Pu}$	$0,22 \pm 0,07$	$0,16 \pm 0,033$	$0,273 \pm 0,015$	$0,364 \pm 0,019$
Matières en suspension marines (Bq/kg sec)	^{241}Am	/	/	$0,659 \pm 0,043$	/
	^{238}Pu	/	/	$0,267 \pm 0,031$	/
	$^{239+240}\text{Pu}$	/	/	$0,67 \pm 0,05$	/
Algues (Bq/kg sec)	^{241}Am	$0,027 \pm 0,013$	$0,033 \pm 0,007$	$0,03 \pm 0,0029$	$0,048 \pm 0,005$
	^{238}Pu	< 0,032	$0,0116 \pm 0,0024$	$0,0174 \pm 0,0016$	$0,0357 \pm 0,003$
	$^{239+240}\text{Pu}$	$0,25 \pm 0,06$	$0,0214 \pm 0,0039$	$0,0303 \pm 0,0022$	$0,093 \pm 0,005$
Crustacés (Bq/kg frais)	^{241}Am	/	$0,009 \pm 0,0047$	$0,024 \pm 0,0046$	$0,027 \pm 0,006$
	^{238}Pu	/	$0,005 \pm 0,0043$	$0,0095 \pm 0,0022$	$0,0127 \pm 0,003$
	$^{239+240}\text{Pu}$	/	$0,011 \pm 0,006$	$0,0095 \pm 0,0023$	$0,0133 \pm 0,0034$
Mollusques (Bq/kg frais)	^{241}Am	< 0,0033	< 0,0029	$0,0077 \pm 0,0008$	$0,0122 \pm 0,0014$
	^{238}Pu	< 0,0008	< 0,0017	$0,00232 \pm 0,00031$	$0,0031 \pm 0,00048$
	$^{239+240}\text{Pu}$	$0,0039 \pm 0,0011$	$0,0022 \pm 0,00044$	$0,00486 \pm 0,00045$	$0,0062 \pm 0,0007$
Poissons (Bq/kg frais)	^{241}Am	< 0,0031	$0,00145 \pm 0,00044$	$0,00225 \pm 0,00041$	$0,0029 \pm 0,0006$
	^{238}Pu	< 0,0017	< 0,0008	$0,00195 \pm 0,00033$	$0,00204 \pm 0,0004$
	$^{239+240}\text{Pu}$	< 0,0033	< 0,0013	$0,00192 \pm 0,00035$	$0,00202 \pm 0,00045$

Dans les sédiments sableux de la Manche, les concentrations en plutonium 239+240 et en plutonium 238 dépassent rarement 1 et 0,8 Bq/kg sec, respectivement, à comparer avec 0,3 et 0,008 Bq/kg sec hors de toute influence industrielle. En mer d'Irlande, ces concentrations ont dépassé 1 000 Bq/kg sec dans les sédiments marins proches de l'émissaire de l'usine de Sellafield, et même 10 000 Bq/kg sec dans les sédiments de l'estuaire de l'Esk (Royaume-Uni).

Les transuraniens mesurés dans la Manche et la mer du Nord suivent une distribution classique au regard des activités rejetées par les usines de retraitement du combustible usé (*figure II.81*). Les plus hautes activités sont observées au niveau de l'anse des Moulinets, qui est la station de prélèvement située sous l'influence directe des rejets du site industriels de La Hague (activités maximales mesurées en américium 241, plutonium 238 et plutonium 239+240 de 9 ± 5 ; $0,55 \pm 0,15$ et $1,07 \pm 0,21$ Bq/kg sec respectivement). Ces radionucléides ne sont plus détectés à l'ouest de Roscoff et à Dunkerque, ou présentent des activités très faibles situées dans les ordres de grandeur observés pour les sédiments prélevés en dehors de l'influence directe des installations nucléaires.

Les variations observées sont également liées à la nature des sédiments prélevés (vase, sable), les plus fins ayant une plus forte propension à fixer les radionucléides. En effet, les concentrations en transuraniens dans les sédiments dépendent de leur surface spécifique donc, en premier lieu, de l'abondance et de la nature de la fraction la plus fine, souvent riche en minéraux argileux. Pour un site donné, elles peuvent varier d'au moins un ordre de grandeur entre des sédiments sableux et des sédiments vaseux. Le rapport d'activité plutonium 238/plutonium 239+240 permet notamment de s'affranchir des variations de concentrations en plutonium 238 et en plutonium 239+240 seulement liées à la granulométrie et la minéralogie du sédiment. L'étude de ce rapport isotopique permet de caractériser les sources du plutonium : un rapport proche de 0,03 est caractéristique des retombées atmosphériques ; l'usine de Sellafield présente un rapport d'environ 0,2. Ce rapport isotopique évolue fortement dans les rejets de l'usine de La Hague en raison du taux de combustion. Une valeur maximale proche de 0,7 est actuellement observée dans les sédiments de Manche centrale.

■ **Figure II.81** - Évolution du rapport d'activités plutonium 238/plutonium 239+240 observé dans les sédiments marins et les matières en suspension prélevés entre janvier 2011 et décembre 2012 le long du littoral Manche – mer du Nord (Bq/kg sec).



Flore aquatique marine

Les analyses réalisées sur les algues prélevées entre janvier 2011 et décembre 2012 révèlent la présence de radionucléides transuraniens avec des activités du même ordre de grandeur que les années antérieures récentes, et fluctuantes selon les stations de prélèvement. Comme observé sur les sédiments, les valeurs les plus élevées sont relevées sur les stations les plus proches de l'émissaire de rejet de La Hague, notamment au niveau du port de Goury, qui est la station de prélèvement située sous l'influence directe des rejets du site industriel de La Hague et pour laquelle les maxima sont généralement observés.

La légère augmentation des activités en américium 241 mesurées dans la Manche et la mer du Nord (entre $0,006 \pm 0,006$ et $0,099 \pm 0,037$ Bq/kg sec) par rapport à celles mesurées dans l'Atlantique (maximum de $0,036 \pm 0,019$ Bq/kg sec à Saint-Pierre-d'Oléron) est attribuable à un léger marquage par les rejets des usines de La Hague et Sellafield. La même observation est faite pour le plutonium 238 dont les activités mesurées dans la Manche et la mer du Nord fluctuent entre $0,0048 \pm 0,0029$ et $0,31 \pm 0,13$ Bq/kg sec (en 2011-2012, ce radionucléide n'a été détecté qu'une fois dans l'Atlantique à des niveaux très proches de la limite de détection : $0,0048 \pm 0,0041$ Bq/kg sec à Brest en octobre 2011).

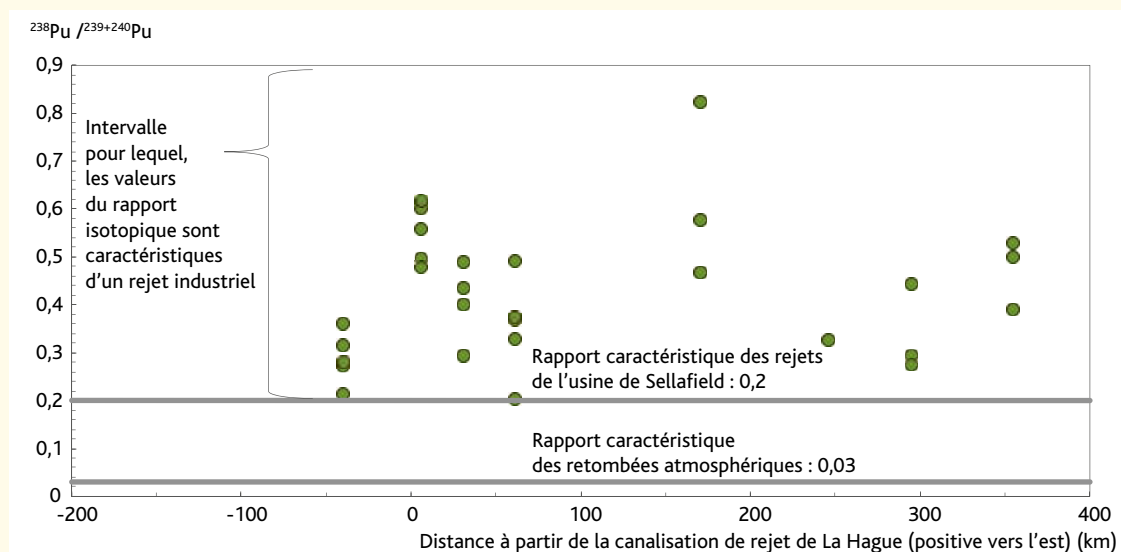
Concernant les isotopes 239 et 240 du plutonium, les activités mesurées au port de Goury sont près de neuf fois supérieures à celles observées dans l'Atlantique. Le rapport isotopique plutonium 238/plutonium 239+240, supérieur à 0,2, permet de confirmer l'origine industrielle de ces radionucléides sur l'ensemble du littoral Manche – mer du Nord (figure II.82).

Faune aquatique marine

Actuellement, les rejets les plus significatifs proviennent des usines de retraitement du combustible usé, et les efforts des exploitants se matérialisent par une diminution des quantités rejetées, induisant des teneurs dans le milieu naturel en diminution. En Manche, depuis le début des années 1980, les teneurs en plutonium ont diminué d'un facteur 5 à 10 chez les espèces du fait de la diminution des quantités rejetées par l'usine de La Hague. Le long des côtes françaises de la Manche, les concentrations sont actuellement inférieures à 1 Bq/kg sec (environ 0,2 Bq/kg frais) chez des espèces indicatrices, mollusques, patelles et moules. Les analyses effectuées en 2011 et 2012 montrent que les activités en transuraniens mesurées dans la faune marine sont plus élevées à proximité immédiate de l'émissaire de rejet de La Hague, puis diminuent progressivement avec l'éloignement au site (figure II.83). Le rapport isotopique plutonium 238/plutonium 239+240, supérieur à 0,2 confirme l'origine industrielle de ces radionucléides.

En règle générale, les potentialités de fixation diminuent des organismes inférieurs (plancton, algues) jusqu'aux organismes supérieurs (poissons). Les facteurs de concentration du plutonium obtenus *in situ* sont dans les gammes suivantes pour les organismes entiers : 40 à 2 500 pour les crustacés, 20 à 8 000 pour les mollusques, et de 1 à 600 pour les poissons. Ce phénomène est observé sur les données obtenues en 2011 et 2012 : les activités en américium et en plutonium sont plus faibles chez les poissons que chez les autres espèces marines.

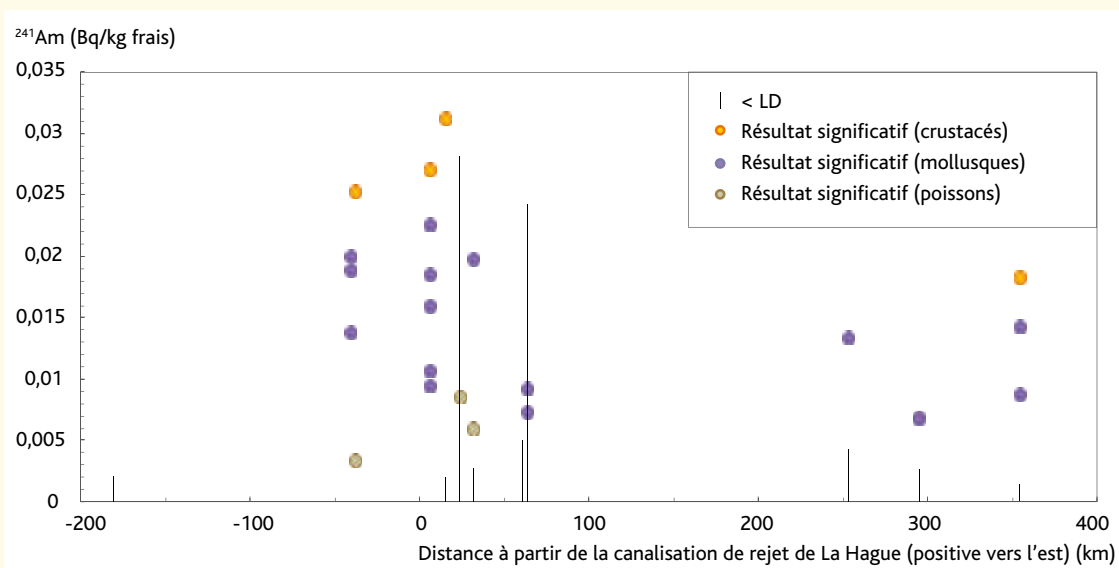
■ **Figure II.82** - Évolution du rapport d'activités plutonium 238/plutonium 239+240 observé dans les algues prélevées entre janvier 2011 et décembre 2012 le long du littoral Manche – mer du Nord (Bq/kg sec).



En résumé

Les transuraniens mesurés aujourd'hui dans l'environnement proviennent essentiellement des essais nucléaires atmosphériques réalisés entre 1950 et 1980 et des rejets des centres de retraitement de combustible irradié. De ce fait, les activités en transuraniens mesurées dans les sédiments et les cours d'eau qui ne sont pas sous influence des rejets des installations précitées représentent le bruit de fond national correspondant aux retombées des essais atmosphériques anciens. Des valeurs légèrement plus élevées sont mesurées dans l'environnement proche (sédiments et matières en suspension) des installations de Saclay et Bruyères-le-Châtel imputables aux rejets anciens de ces installations. Ils sont régulièrement mesurés dans les sédiments et les bio-indicateurs marins (algues, crustacés, mollusques ou poissons) prélevés à proximité du site de La Hague, témoignant des rejets actuels de ce site.

■ **Figure II.83** - Évolution de l'activité en américium ^{241}Am observée dans la faune aquatique marine prélevée entre janvier 2011 et décembre 2012 le long du littoral Manche – mer du Nord (Bq/kg frais).







© Laurent Zylberman/Graphix-Images/IRSN



LES CONSTATS RADIOLOGIQUES RÉGIONAUX

III.1 Objectif et méthodologie

III.2 Le constat « Vallée du Rhône »

III.3 Le constat « Sites miniers du bassin versant de la Dordogne »

III.4 Le constat radiologique en Nouvelle-Calédonie

Les constats radiologiques régionaux ont pour objectif d'établir sur un territoire étendu (plusieurs départements), un référentiel actualisé des niveaux de radioactivité dans certains compartiments de l'environnement caractéristiques du territoire concerné. Selon l'emprise du constat et le milieu étudié, l'accent est mis sur les productions agricoles végétales et animales typiques du territoire concerné, les produits de la pêche ou les (bio)indicateurs naturels.

III.1 OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE

Ce référentiel doit rendre compte, d'une part, du « bruit de fond » radiologique lié à la radioactivité naturelle et à la rémanence des retombées atmosphériques anciennes (essais d'armes nucléaires et accident de Tchernobyl) et, d'autre part, de l'influence des rejets actuels ou passés des installations nucléaires éventuellement présentes sur ce territoire. En cas de rejet incidentel ou accidentel, ce référentiel servirait de base de comparaison et contribuerait à l'orientation du déploiement d'une surveillance renforcée.

L'établissement d'un constat radiologique régional passe en premier lieu par l'examen des données déjà disponibles, notamment celles acquises par l'IRSN dans le cadre de la surveillance permanente ou lors d'études radioécologiques antérieures. Ces connaissances sont ensuite complétées et actualisées par des prélèvements et des analyses spécifiques. Ces constats doivent ainsi élargir la connaissance radiologique de l'environnement, spatialement, en particulier dans des zones moins régulièrement investiguées que les alentours proches des sites nucléaires, et aussi par la diversification des échantillons prélevés et des radionucléides recherchés.

Pour établir cet état de référence, l'IRSN met en œuvre les méthodes de prélèvement, de traitement et de mesurage des échantillons les plus performantes. Selon la complexité du

territoire, l'établissement d'un constat nécessite trois à quatre ans entre son démarrage et sa restitution finale. Un constat est destiné à être actualisé selon une périodicité de l'ordre de huit à dix années environ. Les membres des Commissions locales d'information (Cli), autorités et administrations locales, sont avisés de l'élaboration de la stratégie d'échantillonnage à laquelle ils peuvent coopérer. Ils sont informés des résultats et sont destinataires des rapports édités à l'occasion de chaque étude.

Divers constats ont été entrepris ou sont programmés sur l'ensemble du territoire métropolitain (figure III. 1). Après le prototype « Val de Loire », deux grandes régions ont été investiguées depuis 2009 avec les constats en cours d'achèvement « Sud-Ouest » et « Vallée du Rhône », suivis de l'étude « Nord-Est ». Le Bassin parisien puis la Bretagne seront étudiés à partir de 2015. La façade maritime est également investiguée avec les constats « Manche – mer du Nord » et « Méditerranée » (adaptation de la méthodologie au milieu marin). Par ailleurs, le constat « Nouvelle-Calédonie » est en cours de finalisation. Des constats relevant d'une thématique particulière sont en outre prévus : zones de rémanence (état radiologique actuel des territoires où les retombées des essais aériens d'armes nucléaire et Tchernobyl avaient été les plus élevées), sites miniers (extension des zones de surveillance d'anciennes mines d'uranium à l'aval hydraulique lointain).

Chaque constat est évidemment basé sur une méthodologie adaptée aux caractéristiques du territoire (milieux terrestre, fluvial, marin...), à la présence contemporaine ou passée des

Figure III.1 - Répartition géographique des principaux constats radiologiques régionaux entrepris ou programmés sur le territoire français métropolitain.



installations à l'origine de rejets environnementaux, ainsi qu'aux types de radionucléides susceptibles d'être mesurés. Les constats prennent en compte la localisation des installations nucléaires, en distinguant les zones potentiellement influencées de celles qui peuvent être considérées comme étant, en fonctionnement normal, hors de leur influence (figure III. 2). Lorsqu'existent des **rejets atmosphériques**, les zones non influencées sont celles situées à une distance suffisante (plusieurs dizaines de kilomètres) des points de rejets et hors des vents dominants. Comme ce sont des parties du territoire sur lesquelles des prélèvements sont habituellement rares ou inexistant, une majorité d'échantillons y sont collectés.

Dans le cas où des installations rejettent des radionucléides **en milieu fluvial**, les zones potentiellement influencées sont celles situées en aval de chacune des installations, les zones non influencées étant théoriquement situées en amont. Toutefois, la succession d'installations le long des grands fleuves (exemple sur la Loire) rend plus difficile la détermination de ces dernières, l'amont d'une installation correspondant à l'aval de la précédente.

Dans le cas des **zones de rémanence**, les lieux et types d'échantillons qui témoignaient des niveaux les plus élevés (césium 137) lors des travaux antérieurs sont étudiés à nouveau afin d'en connaître l'évolution spatio-temporelle.

Dans le cas de l'étude particulière des **sites miniers**, des (bio)indicateurs prélevés, jusqu'à des distances bien supérieures à celles habituellement prises en compte, dans les petits bassins versants qui sont les exutoires potentiels des radionucléides issus de ces sites (lessivage, érosion), font l'objet de mesures des actinides.

Lorsque le constat concerne le **milieu marin**, les zones aquatiques sont à définir en fonction de l'existence de rejets littoraux directs (Manche – mer du Nord) ou indirects (apports du Rhône en Méditerranée) et de la courantologie générale ; les

compartiments étudiés sont évidemment focalisés sur les pêches professionnelles ou de loisir et les indicateurs marins (algues...).

La méthodologie générale comporte trois étapes principales qui se déclinent de façon adaptée à chaque type de constat (figure III. 3, page 116) :

- ❶ l'étude documentaire composée d'une étude géographique et historique ainsi que d'une synthèse environnementale ;
- ❷ l'étude de terrain qui comporte une phase de prospection et une phase d'échanges avec les parties prenantes locales qui en font la demande ;
- ❸ l'étape de réalisation des prélèvements, de métrologie et d'exploitation des résultats, puis leur restitution.

L'étape ❶ comporte une phase essentielle de collecte et d'analyse des informations les plus pertinentes sur le territoire étudié (installations actuelles ou passées effectuant des rejets radioactifs dans l'environnement, productions agricoles représentatives, espaces naturels...). Les données acquises par l'IRSN dans le cadre de sa propre mission de surveillance ainsi que celles figurant dans les études régulièrement effectuées au voisinage des sites nucléaires par l'IRSN ou d'autres organismes sont synthétisées et exploitées.

Cette phase de collecte et de synthèse des données existantes bénéficie également des connaissances plus générales acquises par l'IRSN sur le bruit de fond naturel et rémanent en France, ainsi que sur le comportement des radionucléides dans l'environnement. Elle permet de juger, *a priori*, du niveau de contamination des secteurs étudiés et de prévoir les prélèvements et analyses les plus pertinents pour vérifier ou compléter ces données. En particulier, les points qui témoignaient d'un marquage significatif dans le passé seront échantillonnés à nouveau pour connaître leur évolution récente, en sélectionnant les matrices (types d'échantillons) dans lesquelles les isotopes recherchés seront potentiellement les plus abondants.

■ **Figure III.2** - Schéma des zones potentiellement influencées (ZI) ou non (ZNI) par les rejets d'une installation. Exemple d'installation ayant des rejets atmosphériques et des rejets liquides dans un fleuve.



À partir de ces informations, une stratégie d'échantillonnage (étape ②) est établie en concertation avec les acteurs locaux (notamment les Commissions locales d'information ou Commissions de suivi des sites – CSS – autour des mines). La stratégie est précisée par l'identification des types et des lieux de prélèvements, l'établissement pratique du planning de prélèvement, incluant les contacts locaux (exploitants agricoles, associations).

Les campagnes de prélèvement auxquelles participent éventuellement les acteurs locaux, le traitement des échantillons et leur mesure constituent l'étape ③. Différentes analyses sont réalisées au moyen des meilleures techniques disponibles sur les échantillons les plus appropriés pour quantifier les niveaux des principaux radionucléides naturels et artificiels présents en quantité mesurable dans l'environnement : analyses de tritium libre et lié, de carbone 14, spectrométrie gamma, radiochimie et spectrométrie alpha ou comptage bêta respectivement pour les isotopes du plutonium et pour le strontium 90, ICP-MS pour les isotopes de l'uranium... Cette étape s'achève avec la publication des rapports et la restitution de l'étude aux différentes parties prenantes.

III.2 LE CONSTAT « VALLÉE DU RHÔNE »

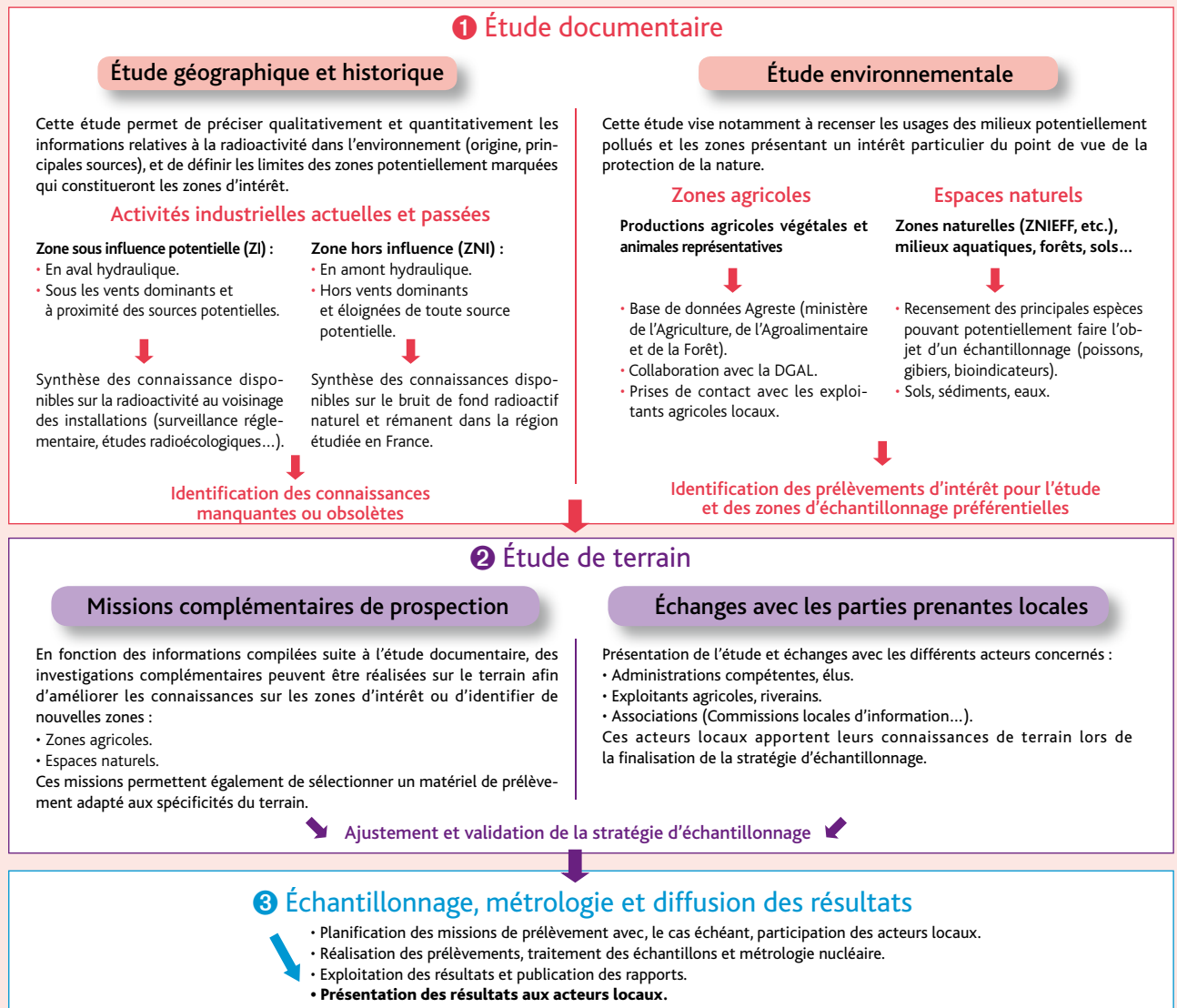
Les stratégies d'échantillonnage mises en œuvre pour les volets « terrestre » et « aquatique » du constat radiologique de la vallée du Rhône ont été présentées dans le *Bilan de l'état radiologique de l'environnement français en 2010-2011*. Après un bref rappel de cette stratégie, ce rapport présente les principaux résultats obtenus.

Milieu terrestre

Le territoire étudié s'étend sur les 270 communes limitrophes du Rhône, de l'amont de Creys-Malville jusqu'en Camargue, représentant plus de 500 000 hectares, dont environ la moitié en surfaces agricoles.

Les prélèvements (2009-2011) sont répartis le long de la vallée, sur les zones potentiellement influencées (ZI < 5 km) par les installations nucléaires et sur les zones non influencées (ZNI > 20 km). Une centaine d'échantillons ont été prélevés,

■ **Figure III.3** - Illustration de la méthodologie de réalisation des constats radiologiques. Cet exemple illustre la méthode déployée dans le cas des constats réalisés en milieu continental, tenant compte des installations nucléaires situées sur des grands fleuves et des territoires à dominante agricole (Val de Loire, Vallée du Rhône, Garonne...).



notamment des denrées caractéristiques de la région : légumes (ail, aubergines, courgettes, poivrons, salades, tomates), fruits (abricots, cerises, châtaignes, noix, raisin, pêches, pommes), produits laitiers (lait de chèvre, lait de vache, fromage de chèvre), céréales (blé, maïs, riz), viandes (bœuf, poulet, taureau, sanglier), autres produits (œufs, huile d'olive, miel, romarin, thym, vin) ; ces échantillons ont fait l'objet de mesures par spectrométrie gamma à bas bruit de fond et de la mesure du strontium 90 dans les produits laitiers. En outre, des échantillons de feuilles d'arbres ont servi à mesurer le carbone 14 et le tritium. Au final, près de 1 500 résultats d'analyses ont ainsi été acquis.

Les résultats confirment les concentrations attendues et aucune anomalie par rapport aux valeurs déjà connues n'a été mise en évidence par ces mesures.

Principaux résultats

Le seul radionucléide artificiel mesuré en spectrométrie gamma au dessus des limites de détection (dans 61 % des échantillons) est le césium 137 rémanent. La vallée du Rhône a été inégalement impactée par l'accident de Tchernobyl : la variabilité initiale des dépôts se traduit par des différences de niveau de contamination des différentes composantes de l'environnement. Dans les productions agricoles, le césium 137 varie entre 0,001 et 0,1 Bq/kg frais.

En ce qui concerne les actinides transuraniens, quelques singularités subsistent encore à proximité immédiate de Marcoule, sans pour autant constituer des anomalies au regard des rejets historiques de ce site. En attestent les sols (et quelques végétaux : mousses, thym, romarin) avec des niveaux dans les sols de 0,07 à 0,37 Bq/kg sec pour l'américium 241, de 0,016 à 0,074 pour le plutonium 238 et de 0,11 à 0,50 pour le plutonium 239+240 et, notamment des rapports

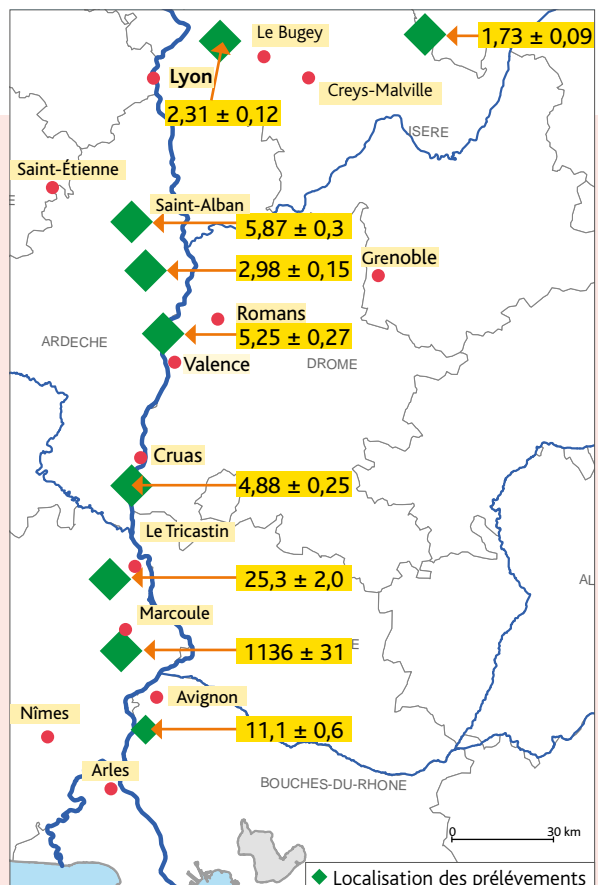
plutonium 238/plutonium 239+240 significativement supérieurs à celui des tirs (i.e., 0,03). Par ailleurs, des sols de rizières de Camargue – qui avaient subi un apport massif de matières en suspension lors de la crue exceptionnelle de 2003 – ne montrent plus de différence notable par rapport aux zones hors influence en termes de concentration (0,11 Bq/kg sec en américium 241 ; 0,01 Bq/kg sec en plutonium 238 et 0,18 Bq/kg sec en plutonium 239 + 240) mais les rapports isotopiques témoignent encore de l'empreinte des inondations passées.

Les activités du strontium 90 se situent entre 0,02 et 0,05 Bq/L dans le lait de vache comme dans le lait de chèvre et entre 0,02 et 0,07 Bq/kg frais dans le fromage de chèvre, sans que l'on note de différence entre ZI et ZNI.

Les résultats des mesures du carbone 14 dans les feuilles de peuplier sont au voisinage de la valeur du bruit de fond en 2010 (234 ± 2 Bq/kg C) et varient entre $231 \pm 1,3$ Bq/kg C et $237 \pm 1,3$ Bq/kg C. L'influence des CNPE est peu ou pas décelable ; en revanche, on note une légère augmentation de concentration à proximité du Tricastin et de Marcoule ($247 \pm 1,3$ Bq/kg C). En termes d'activités massiques, les valeurs se situent entre une trentaine et une cinquantaine de becquerels par kilogramme frais.

De l'amont du Rhône jusqu'à Donzère, les concentrations du tritium lié dans les feuilles de peupliers sont au niveau du bruit de fond ou le dépassent à peine. Au sud, à partir de Pont-Saint-Esprit, se manifeste l'influence des rejets de Pierrelatte puis de ceux de Marcoule (plus de 1 000 Bq/L mesurés au sud immédiat du site) qui décroissent jusqu'à une trentaine de kilomètres vers le sud ; l'influence des rejets atmosphériques des CNPE est discrète voire insignifiante et n'est pas homogène (figure III.4). Par ailleurs, le tritium libre varie de façon inexpliquée.

■ **Figure III.4 -** Activité du tritium organiquement lié, mesuré dans des feuilles de peupliers (Bq/L d'eau de combustion).



Milieu aquatique

Le Rhône est la plus importante source d'eau et de matériel particulaire qui transite vers la Méditerranée nord occidentale. Avec un bassin versant d'environ 96 500 km² et 800 km de long, son débit, de l'ordre de 250 m³/s à Genève, atteint près de 1 700 m³/s à son embouchure. C'est aussi un fleuve particulièrement nucléarisé, sur lequel se trouvent quatre Centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) en activité¹, un réacteur à neutrons rapides (RNR)² en démantèlement, ainsi que plusieurs installations d'Areva³ et du CEA⁴.

Le volet aquatique de ce constat présente une image de l'état radiologique du fleuve par l'étude des très nombreuses données acquises depuis une trentaine d'années et par l'examen des résultats de mesure de prélèvements complémentaires (sédiments, végétaux, poissons, mollusques, eau et matières en suspension).

Une cinquantaine d'échantillons spécifiques au constat ont été prélevés entre avril 2010 et mai 2012 puis traités, et près de 200 analyses ont été effectuées.

Origines de la radioactivité mesurée dans le Rhône et ses affluents

Outre la radioactivité naturelle, des contaminations chroniques ou accidentelles ont atteint le Rhône ces soixante dernières années. Son bassin versant a été soumis aux retombées globales des essais d'armes nucléaires atmosphériques (rémanence du césium 137, du strontium 90 et des actinides transuraniens) ainsi qu'aux dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl (rémanence du césium 137).

À ce bruit de fond d'origine atmosphérique, viennent s'ajouter les rejets liquides et, dans une moindre mesure, les rejets gazeux des installations. Les radionucléides prédominants

dans ces rejets sont actuellement le tritium et le carbone 14. En 2011, environ 230 TBq⁵ de tritium ont été rejetés dans le Rhône par les installations nucléaires, 90 % de ces rejets étaient imputables aux CNPE et 10 % à Marcoule. Les autres radionucléides rejetés par les CNPE sont le carbone 14 (153 GBq en 2011), qui représente 97 % des rejets hors tritium, ainsi que divers produits de fission et d'activation⁶ représentant une activité totale de l'ordre de 4 GBq. Le centre en déconstruction de Creys-Malville participe à 0,3 % de l'activité totale rejetée dans le Rhône. Le centre de Marcoule est susceptible de rejeter, en outre, de très faibles quantités d'iode 129, de strontium 90, d'autres produits d'activation que ceux précédemment cités, ainsi que des émetteurs alpha (plutonium, américium). Les isotopes de l'uranium, les actinides transuraniens et quelques produits de fission sont rejetés par les centres Areva de Pierrelatte et de Romans-sur-Isère. Les rejets des installations localisées sur les affluents ne représentent qu'une partie infime des rejets totaux atteignant le Rhône. Enfin, les centres hospitaliers pratiquant des activités de médecine nucléaire génèrent irrégulièrement des rejets de radionucléides à courte période, notamment de l'iode 131. La figure III.5 localise les installations nucléaires présentes sur le Rhône ou ses affluents.

Sur le Rhône, les zones potentiellement influencées par un rejet (ZI) sont naturellement celles situées en aval de chacune des installations, soumises non seulement aux rejets de l'installation en question mais aussi, éventuellement, à ceux des installations situées en amont. Les zones non influencées (ZNI) situées à l'amont du rejet d'une installation peuvent

1 - Bugey, Saint-Alban, Cruas, Tricastin.

2 - Creys-Malville.

3 - Site de Pierrelatte.

4 - Centre de Marcoule.

5 - Évaluation selon les déclarations des exploitants.

6 - Dont ¹³¹I, ⁵⁴Mn, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ^{110m}Ag, ¹²⁴Sb, ¹²⁵Sb, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ⁶³Ni...

Figure III.5 - Cartographie des installations nucléaires présentes sur le Rhône et ses affluents.



être potentiellement influencées par les rejets des installations encore plus à l'amont. On considère donc, sur le Rhône, la zone amont de Creys-Malville comme zone de référence, non influencée par les rejets de l'industrie nucléaire et la zone aval proche de Marcoule comme potentiellement la plus influencée.

Trois grands secteurs se distinguent le long du fleuve :

- le premier secteur, **en amont de Creys-Malville**, a été principalement soumis aux retombées des tirs atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl et au tritium de l'industrie horlogère suisse ;
- le deuxième, **de Creys-Malville à Marcoule** est, en plus, soumis aux rejets des sites nucléaires ;
- le dernier secteur, **à l'aval du site de Marcoule**, est potentiellement le secteur le plus influencé par les rejets cumulés dans le Rhône.

Principaux résultats

L'examen des résultats de mesures disponibles montre que les activités des radionucléides d'origine naturelle sont relativement constantes dans le temps et le long du linéaire rhodanien ; le potassium 40 est le radionucléide prédominant, quelle que soit la matrice analysée.

Globalement, les niveaux et la variété des radionucléides d'origine artificielle ont diminué durant ces trente dernières années. Des radionucléides émetteurs gamma qui étaient autrefois régulièrement mesurés ne sont plus actuellement détectés que sporadiquement, voire jamais, malgré l'amélioration des techniques de prélèvements et d'analyses permettant d'abaisser les limites de détection. Cette diminution des niveaux est liée à la décroissance des radionucléides qui avaient été disséminés lors des tirs atmosphériques et après l'accident de Tchernobyl, ainsi qu'à la réduction très importante des activités rejetées par les installations nucléaires.

Parmi les radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma, seul le césium 137 est détecté dans l'eau filtrée avec une concentration moyenne sur les dix dernières années de 0,09 mBq/L en amont de Creys-Malville et de 0,4 mBq/L à Arles (station Sora). À Arles, des concentrations faibles (du dixième au centième de mBq/L) de radionucléides⁷ provenant des installations sont également mesurées. Les activités massiques mesurées en césium 137 dans les matières en suspension sont du même ordre de grandeur dans les échantillons collectés par l'hydrocollecteur de Vallabrègues et dans ceux de la station Sora, de l'ordre de 16 Bq/kg sec en moyenne. Le césium 137 est également le seul radionucléide d'origine artificielle détecté par spectrométrie gamma dans les matières en suspension prélevées dans les principaux affluents du Rhône ($7 \pm 0,9$ Bq/kg sec en moyenne).

Dans les matrices biologiques et les sédiments, le césium 137 subsiste de façon régulière avec des concentrations actuellement de l'ordre de la dizaine de Bq/kg sec dans les sédiments et de l'ordre du Bq/kg sec dans les échantillons biologiques. Les concentrations en cobalt 60, cobalt 58, argent 110m et manganèse 54, variables le long du linéaire, restent assez faibles (sédiments : autour de 0,5 Bq/kg sec) et environ cinq fois plus élevées dans la zone aval (Marcoule), où l'on observe aussi la présence de cobalt 57 et d'américium 241.

Les concentrations actuelles en plutonium 238 et plutonium 239+240 dans les sédiments sont relativement comparables à celles observées dans les années 1980, contrairement aux concentrations dans les végétaux qui ont fortement diminué. Dans les poissons, seul le plutonium 239+240 est mesuré sporadiquement à des niveaux compris entre 3 et 4.10^{-5} Bq/kg sec. Le rapport isotopique plutonium 238/plutonium 239+240 reste caractéristique de celui des retombées des tirs atmosphériques anciens (0,03) jusqu'à Tricastin, puis augmente à l'aval de Marcoule, témoignant des rejets historiques des installations de ce site. Les concentrations moyennes, sur ces dix dernières années, hors influence directe du site de Marcoule, sont de 0,03 Bq/kg sec dans les phanérogames, de 0,16 Bq/kg sec dans les sédiments et de 0,1 Bq/kg sec dans les mousses pour le plutonium 239+240. Elles sont de l'ordre de 0,001 Bq/kg sec dans les phanérogames, de 0,006 Bq/kg sec dans les sédiments et de 0,003 Bq/kg sec dans les mousses pour le plutonium 238. Les concentrations moyennes en américium 241 sont dix fois supérieures à celles du plutonium 238. Les sédiments prélevés à l'aval proche de Marcoule présentent les activités maximales mesurées : environ 2 Bq/kg sec pour l'américium 241 et le plutonium 239+240 et 0,3 Bq/kg sec en plutonium 238.

Les niveaux de strontium 90 ont fortement baissé depuis trente ans ; ils sont relativement faibles et peu différents entre l'amont et l'aval du Rhône, de l'ordre du Bq/kg sec dans les végétaux et les sédiments et de l'ordre de $0,08 \pm 0,01$ Bq/kg frais dans les poissons. Par ailleurs, l'impact des rejets de la médecine nucléaire est perceptible par la présence de l'iode 131, à des niveaux fluctuants (i.e., jusqu'à 70 Bq/kg sec dans les phanérogames) à l'aval des grandes agglomérations.

D'autre part, aucune accumulation de l'uranium et de ses isotopes ou de radionucléides artificiels n'a été relevée à l'aval hydraulique des rejets provenant du site FBFC de Romans-sur-Isère.

Le tritium est le radionucléide le plus abondant dans l'eau filtrée du Rhône. Il est issu principalement des rejets des CNPE. Les activités en tritium organiquement lié des sédiments sont plus élevées en amont du fleuve qu'à l'aval (de 9 000 à 500 Bq/litre d'eau de combustion) en raison de la rémanence des rejets issus des industries horlogères suisse et française. À l'inverse, dans les poissons, les concentrations

7 - Dont ¹³¹I, ⁵⁴Mn, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ^{110m}Ag, ¹²⁴Sb, ¹²⁵Sb, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ⁶³Ni...

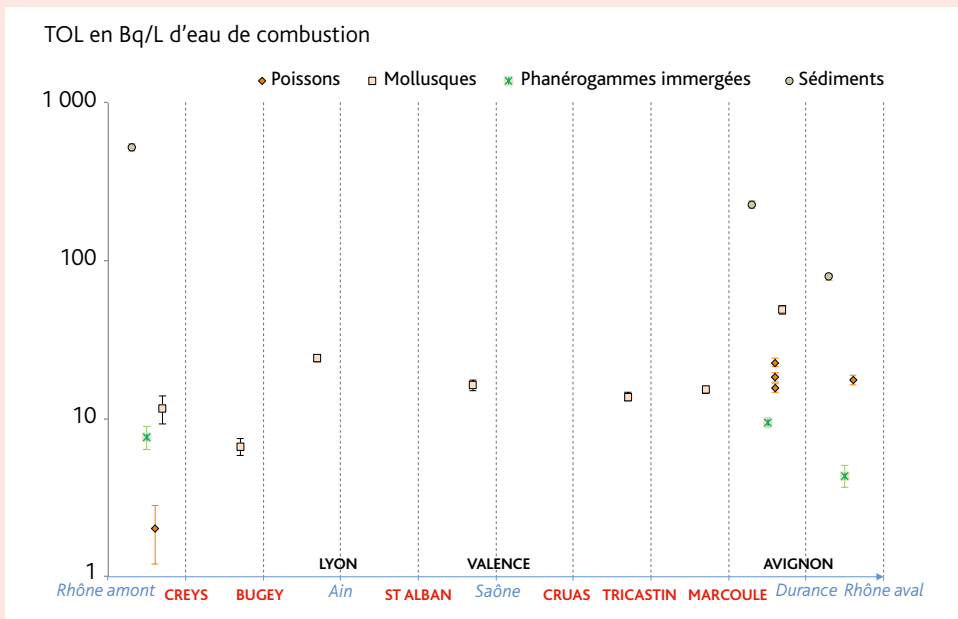
augmentent de l'amont vers l'aval (de 5 à 30 Bq/litre d'eau de combustion) témoins de l'influence des installations nucléaires. Les activités dans les phanérogames sont relativement constantes (respectivement 10 et 30 Bq/litre d'eau de combustion à l'amont et à l'aval) (figure III.6).

Le carbone 14 mesuré dans les mollusques et les poissons témoigne également d'une augmentation progressive de sa concentration de l'amont vers l'aval : des valeurs maximales de l'ordre de 1 300 Bq/kg C sont atteintes dans le secteur aval (Tricastin puis Marcoule) ; l'activité des végétaux est, quant à elle, peu variable. À l'amont du fleuve, dans toutes les

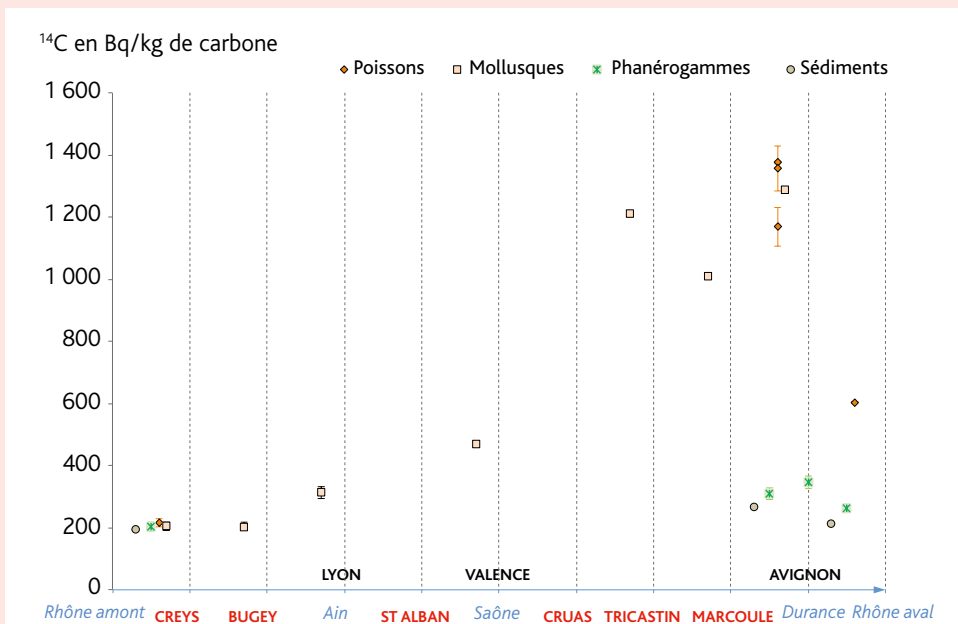
matrices minérales ou biologiques, l'activité spécifique du carbone 14 est au niveau du bruit de fond, autour de 200 Bq/kg C (figure III.7).

Il est, de plus, intéressant de souligner que l'ensemble des données, dont le bilan est présenté dans le rapport de cette étude et qui découlent de modes de prélèvements et d'analyses très divers (fréquences, durées, limites de détection) selon l'objectif particulier des travaux qui les ont occasionnés, fournissent des indications convergentes sur l'état radiologique du milieu aquatique rhodanien.

■ **Figure III.6** - Activité du tritium lié (Bq/litre d'eau de combustion) mesurée dans les échantillons prélevés sur le Rhône dans le cadre du constat radiologique.



■ **Figure III.7** - Activité spécifique du carbone 14 mesurée dans les échantillons prélevés sur le Rhône dans le cadre du constat radiologique (Bq/kg C).



III.3 LE CONSTAT « SITES MINIERS DU BASSIN VERSANT DE LA DORDOGNE »

L'exploitation minière d'uranium exercée dans le passé en France a eu et a encore une incidence sur l'état radiologique du territoire métropolitain. La connaissance et le suivi de l'influence des anciens sites miniers d'uranium sur la radioactivité de l'environnement relèvent de ce fait du champ de la surveillance exercée par l'IRSN, au même titre que l'influence des autres activités nucléaires. La nature et les impacts de l'exploitation minière d'uranium se distinguent de ceux des principales activités nucléaires liées au cycle du combustible et à la production d'énergie électronucléaire. En France, l'exploitation de l'uranium a été exercée entre 1948 et 2001 et a concerné environ 250 sites répartis sur 25 départements (figure III.8). Au total, 52 millions de tonnes de minerais extraits des mines françaises ont été traités pour produire 76 000 tonnes d'uranium ; environ 200 millions de tonnes de roches dites « stériles » ont été dans le même temps générées. Le nombre élevé et la relative dispersion géographique des sites concernés constituent une spécificité importante à souligner. La production d'uranium a été supérieure à mille tonnes sur une dizaine de sites et près d'un tiers des quelque 250 sites recensés n'a en revanche produit qu'une tonne ou moins.

L'objectif de l'IRSN est d'assurer la surveillance de l'ensemble des anciens sites miniers d'uranium, avec une focalisation de l'échantillonnage sur la principale voie de transfert de radio-nucléides que constitue l'eau, en prenant en compte la complémentarité avec les autres actions en cours sur les anciens sites miniers. Les écoulements d'eau constituent un vecteur

prépondérant de transport de la radioactivité issue de l'exploitation des sites miniers vers l'environnement. Son incidence peut se manifester au-delà du voisinage immédiat des anciens sites miniers. Divers usages (alimentation en eau à des fins domestiques, baignade, pêche, irrigation de cultures, abreuvement de bétail...) peuvent alors être impactés.

L'originalité de ce constat est notable par la constitution en amont de la démarche d'un groupe de suivi composé d'acteurs locaux, qui a accompagné le constat tout au long de son déroulement. Le bassin versant retenu par l'IRSN pour réaliser son premier constat minier est celui de la Dordogne qui abrite une vingtaine d'anciens sites principalement en Corrèze. Exploités de 1957 à 1994, ces sites, pour la plupart sous la responsabilité d'Areva Mines, sont localisés sur un ensemble de gisements uranifères granitiques. L'exploitation du minerai a été réalisée par mines à ciel ouvert et travaux miniers souterrains ou travaux de reconnaissance pour les sites de plus petite taille. Les secteurs exploités de la Corrèze sont établis au sein des massifs cristallins localisés dans la partie ouest du département constitués de terrains métamorphiques (gneiss et micaschistes) et du complexe granitique du plateau des Millevaches. Les gisements exploités sont répartis principalement sur les bassins versants de la Dordogne (prélèvements dans l'Isle et la Dronne) et de la Corrèze, au niveau des affluents tels que la Diège, la Luzège, la Glane de Servières, le Doustre, la Maronne et la Vimbelle. Le contexte géologique de la Basse Vallée de la Dordogne est marqué à l'amont par les calcaires tendres du Crétacé parfois recouverts de placages argilosiliceux datant du Tertiaire. Le reste du territoire de la Dordogne Atlantique à l'aval de Mouleydier est formé par les dépôts tertiaires marins ou lacustres, où la vallée est remblayée par des alluvions quaternaires. Le régime hydrologique est de type pluvial avec de hautes eaux hivernales et printanières et un étiage estival

Source : Carte lithologique de la France à 1 / 2 000 000, BRGM, date: Traitements SOeS, 2012.



Figure III.8 - Localisation des zones minières françaises.

- Zones minières faisant l'objet d'une surveillance radiologique réglementaire de l'environnement
- Autres zones minières françaises

souvent sévère. Le débit moyen annuel à Bergerac est de 280 m³/s. La crue maximale enregistrée est celle du 15 janvier 1962 avec 2 600 m³/s.

Le constat minier du bassin versant de la Dordogne vise à acquérir une connaissance fine de la distribution de la radioactivité naturelle liée à la présence d'uranium et de ses descendants radioactifs, en particulier le radium, dans les secteurs exploités et de manière plus générale à l'échelle du bassin. Le plan d'échantillonnage (figure III.9) a été établi en fonction du réseau hydrographique, il définit les lieux retenus pour effectuer les prélèvements d'eaux, de sédiments et d'indicateurs biologiques (végétaux aquatiques et poissons notamment).

L'élaboration du plan d'échantillonnage suit une démarche en deux étapes.

La première étape consiste à **définir un plan-type fondé sur la connaissance actuelle des sites, de leur environnement hydrographique et des usages associés**. Une démarche d'échantillonnage systématique est déclinée, s'appuyant en premier lieu sur les données fournies par les bilans environnementaux produits par Areva Mines, ainsi que sur les informations

complémentaires acquises à l'occasion des contrôles de second niveau Mimausa (Mémoire et impact des mines d'uranium : synthèse et archives ; programme mis en place par l'IRSN à l'initiative du ministère de l'Écologie en 2003, permettant notamment le recensement exhaustif des anciens sites miniers). Ces éléments sont croisés avec ceux accessibles via diverses bases de données publiques alimentées par les organismes intervenant dans la gestion de l'eau et des milieux aquatiques et ceux fournis par Areva Mines, ou issus de contrôles inopinés menés par l'Administration.

Le plan d'échantillonnage est principalement orienté par les écoulements d'eau de surface en amont et en aval de l'ensemble des sites du bassin versant et au niveau des principales confluences. Des prélèvements de sédiments sont également définis à ce stade et ciblent notamment les zones propices à l'accumulation de sédiments potentiellement radiologiquement marqués, en privilégiant les plans d'eau, barrages ou bras morts en aval des sites miniers. Par ailleurs, des végétaux aquatiques ayant la capacité d'accumuler les radionucléides présents dans l'eau peuvent être prélevés, autant que possible sur les mêmes lieux que les eaux et sédiments.

Figure III.9 - Plan d'échantillonnage du constat minier à l'échelle du bassin versant de la Dordogne (Corrèze, Cantal).



La seconde étape consiste à **compléter le plan d'échantillonnage systématique par l'éventuel ajout de points complémentaires destinés à tenir compte d'enjeux spécifiques**. Le recueil de ces enjeux est effectué *via* la consultation des acteurs locaux. À cet effet, l'IRSN a créé un groupe de suivi réunissant des acteurs locaux (Établissement public territorial du bassin de la Dordogne – Epidor, agence de l'eau, maires, sociétés de chasse, fédération de pêche, agriculteurs, association de défense de l'environnement, propriétaires d'anciens sites, gestionnaire de barrage) qui s'impliquent dans l'élaboration du plan d'échantillonnage, sa mise en œuvre mais également la restitution des résultats.

L'existence d'usages spécifiques peut être prise en compte, y compris au voisinage immédiat des sites s'ils suscitent des interrogations particulières. Les modifications éventuelles du plan d'échantillonnage peuvent alors conduire à une augmentation du nombre de points de prélèvement, mais également à la réalisation de mesures sur d'autres compartiments que ceux envisagés initialement dans le plan d'échantillonnage systématique. Cette seconde étape fondée sur une discussion avec les acteurs locaux renforce la pertinence et l'utilité

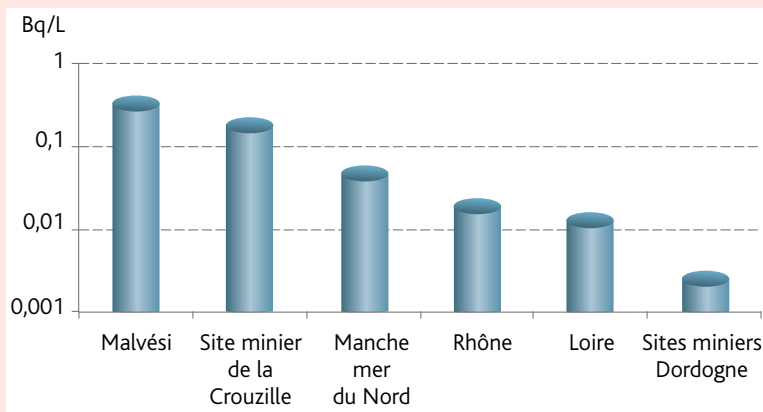
sociétale du constat minier. Les acteurs locaux qui apportent à l'IRSN leurs connaissances de terrain, l'accompagnent au besoin lors de prélèvements.

Les échantillons prélevés ont fait l'objet d'analyses pour déterminer les concentrations en uranium et radium en mettant en œuvre les meilleures techniques disponibles.

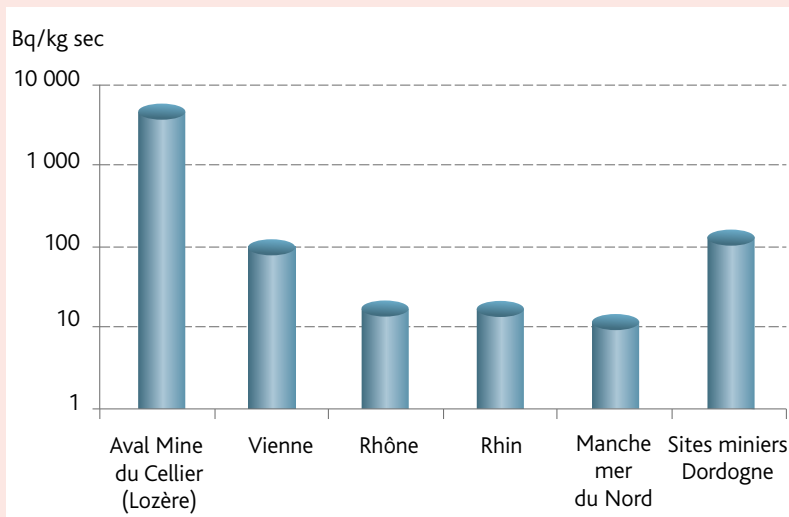
Les premières observations

Les mesures d'uranium 238 obtenues suite à la première campagne de prélèvement du constat minier Dordogne en octobre 2012 indiquent **un faible marquage des eaux de surface** (figure III.10), en comparaison avec les niveaux couramment observés dans l'environnement en France. Elles indiquent également que l'uranium présent dans les cours d'eau du bassin versant de la Dordogne est **principalement porté par les sédiments** (figure III.11).

Les échéances à venir concernent la restitution des résultats aux acteurs locaux ainsi que la production d'un rapport de synthèse.



■ **Figure III.10** - Activité moyenne de l'uranium 238 dans les eaux de surface entre 2006 et 2010 (Bq/L).



■ **Figure III.11** - Activité moyenne de l'uranium 238 dans les sédiments de rivière entre 2006 et 2013 (Bq/kg sec).

III.4 LE CONSTAT RADIOLOGIQUE EN NOUVELLE-CALÉDONIE

L'objectif du constat est d'établir un référentiel actualisé des niveaux de radioactivité dans l'environnement et dans les produits alimentaires locaux consommés par la population, une attention particulière étant apportée à la recherche d'un éventuel impact de l'accident de Fukushima, principalement dans le milieu marin (ZEE⁸ du territoire).

Une comparaison avec les résultats des analyses faites par le LESE⁹ entre 1972 et 1993, dans le cadre du Réseau mondial français de surveillance radiologique (RMFSR), permet d'apprécier l'évolution des niveaux de radioactivité d'origine artificielle en Nouvelle-Calédonie.

Contexte radiologique et stratégie d'analyse

L'absence de source potentielle de contamination industrielle et médicale en Nouvelle-Calédonie (un service de radiothérapie est cependant prévu dans l'avenir) a orienté notre observation vers la radioactivité artificielle résiduelle issue des essais nucléaires atmosphériques qui se sont déroulés dans l'hémisphère sud entre 1953 (premier essai anglais en Australie à Emu) et 1974 (dernier essai français en Polynésie française à Moruroa) ainsi que sur la contamination éventuelle du milieu suite aux rejets de Fukushima. La mesure de césium 134 par spectrométrie gamma permet de rechercher la signature de cet accident, principalement dans le milieu marin

dont la contamination dure depuis deux ans, cet isotope du césium n'étant pas issu des retombées des tirs.

La détection de radionucléides provenant des retombées des essais nucléaires est réalisée avec des méthodes d'analyses établies pour la détection de très faibles niveaux de radioactivité.

Des mesures de débits de dose réalisées sur le terrain complètent ce constat par l'évaluation de l'exposition des populations aux rayonnements d'origine naturelle (rayonnements cosmique et tellurique) et, dans une moindre mesure, d'origine artificielle.

Les 81 échantillons retenus pour ce constat sont des denrées produites et consommées localement, essentiellement sur l'île principale « Grande Terre », constituée des deux provinces Sud et Nord. Le plan d'échantillonnage inclut également des prélèvements d'herbe, de sédiments et de sol.

L'ensemble des informations concernant l'agriculture sont issues du troisième Recensement général agricole (RGA) de 2002 établi en 2003 par la Direction des affaires vétérinaires, alimentaires et rurales et l'Institut de la statistique et des études économiques de Nouvelle-Calédonie.

La nature des échantillons et les types d'analyses retenus découlent de trois considérations principales visant à obtenir :

- les principales denrées produites sur le territoire et disponibles sur les étals lors de deux époques saisonnières ;
- des échantillons considérés de référence, ayant été prélevés dans le passé (lait, banane...) ;
- des indicateurs spécifiques de certains radionucléides (cobalt 60 dans les bœufiers, césium 137 dans les mers et le coprah...).

8 - ZEE : Zone économique exclusive.

9 - LESE : Laboratoire d'étude et de suivi de l'environnement implanté à Tahiti depuis 40 ans et sous l'égide de l'IRSN depuis sa création.

Figure III.12 - Marché de Nouméa.



Échantillonnage et mesure *in situ*

L'agriculture est de type traditionnel avec des surfaces cultivables limitées et des points de vente concentrés sur les marchés dont le principal se situe à Nouméa (figure III.12, page 124). La majorité des échantillons ont été collectés sur ce marché qui regroupe les productions des différentes régions agricoles de Nouvelle-Calédonie, les deux tiers des surfaces cultivées (légumes et fruits) étant situées en province Sud où vit 66 % de la population. Quelques échantillons proviennent d'étals en bord de route. La quasi-totalité des produits laitiers sont importés, essentiellement d'Australie et de Nouvelle-Zélande ; seul un prélèvement de lait entier a pu être réalisé directement auprès d'une ferme locale à Sarraméa. Pour les viandes, la production est importante et permet à la Nouvelle-Calédonie d'être pratiquement auto-suffisante. Les prélèvements ont été axés sur les principales productions (bœuf, porc, cerf et poulet). Ils ont été obtenus dans une grande surface commerciale.

Dans tous les cas, les denrées sont issues de Nouvelle-Calédonie et souvent le lieu précis de production est indiqué sur les étals ou connus par les vendeurs.

Les poissons de haute mer (thon blanc, thon rouge et thon jaune, merlins rayés) pêchés dans trois secteurs de la Zone économique exclusive (ZEE) entre mars et mai 2013 ont été principalement fournis par une pêcherie industrielle de Nouméa. Des mérous, mulets, crabes de palétuvier et des bénitiers ont également été pêchés dans le lagon.

Les sols et sédiments ont été prélevés sur « Grande Terre » et des mesures d'exposition (débits de dose) ont été réalisées sur l'ensemble de l'île pour compléter la situation radiologique

dans le milieu terrestre. La figure III.13 présente les points de prélèvements biologiques terrestres ainsi que de sols et sédiments.

Résultats et restitution¹⁰

Les débits de dose (mesures d'exposition) enregistrés sur l'île principale « Grande Terre » sont très homogènes à l'échelle du territoire et n'excèdent jamais 0,1 $\mu\text{Sv/h}$, du même ordre de grandeur que les valeurs obtenues en Polynésie française. Les mesures de radioactivité dans les sols et dans les sédiments confirment une très faible rémanence du césium 137 issu des retombées des essais nucléaires atmosphériques anciens et indiquent que la radioactivité d'origine naturelle est faible, en cohérence avec les valeurs basses des débits de dose.

¹⁰ - Les résultats plus complets seront publiés ultérieurement lorsque l'ensemble des données sera disponible (échantillons en cours d'analyse).

■ Figure III.13 - Localisation des échantillons biologiques terrestres, de sols et de sédiments.







IV

ANNEXES

IV.1 Présentation et exploitation des résultats

IV.2 Glossaire

IV.3 Sources d'information

IV.4 Comité éditorial

IV.1 PRÉSENTATION ET EXPLOITATION DES RÉSULTATS

Les résultats exploités dans ce bilan, sous forme de graphiques ou de tableaux synthétiques, concernent la période du 1^{er} juillet 2011 au 31 décembre 2012, et sont issus des données IRSN. Dans certains cas, les résultats concernent une période antérieure à juin 2011, ces cas sont limités aux résultats qui n'ont pu être exploités lors de l'analyse précédente (voir le bilan radiologique 2010-2011) pour des raisons de disponibilité des données : en effet, certains échantillons nécessitent des temps de traitement et de mesure très longs et, de ce fait, n'étaient pas encore disponibles au moment de l'analyse des données.

Par ailleurs :

- Les signes « < » indiquent des résultats de mesure inférieurs aux limites de détection des appareils ou des protocoles de mesures. Dans les représentations graphiques, ces valeurs sont représentées par des barres vides ou des traits s'étendant jusqu'à l'origine.
- Le sigle « nm » dans les tableaux indique un paramètre ou un radionucléide non mesuré.
- Les moyennes indiquées sont des valeurs calculées par pondération de l'incertitude associée à chaque résultat individuel. À cette moyenne est associée une incertitude.
- Les résultats sont assortis de commentaires faisant parfois référence aux mesures acquises antérieurement. Dans cette édition, le bilan fait ressortir certaines séries chronologiques, notamment à travers des focus spécifiques.

Expression des résultats sous forme de valeurs moyennes

Pour restituer dans ce bilan les mesures de la radioactivité dans l'environnement de manière plus synthétique et représentative, l'IRSN a choisi d'exprimer les résultats acquis sous la forme d'un estimateur unique qui tient compte de toutes les valeurs acquises en un point au cours de la période considérée, y compris des valeurs inférieures aux limites de détection.

Cette présentation évite de délivrer l'ensemble des résultats individuels dans des tableaux ou graphiques de manière trop répétitive, tout en restant scientifiquement rigoureuse.

L'estimateur choisi correspond à une moyenne pondérée (m) associée à une incertitude (u_m). La méthode consiste à prendre les valeurs significatives avec leur incertitude associée et à substituer aux valeurs dites inférieures à la limite de détection (< Y), une valeur Y associée à une incertitude de Y/2. Cette méthode de substitution n'est pas la plus précise mathématiquement mais ne minimise pas l'influence possible de valeurs considérées comme non significatives.

Le meilleur estimateur de la moyenne d'un ensemble de valeurs Y_i associées à des incertitudes u_i (y compris les valeurs substituées précédemment) peut être calculé comme suit :

$$\text{Moyenne pondérée : } m = \frac{\sum \frac{1}{u_i^2} Y_i}{\sum \frac{1}{u_i^2}}$$

$$\text{Avec comme incertitude : } u_m = \sqrt{1 / \left(\sum \frac{1}{u_i^2} \right)}$$

À titre d'exemple, si l'on dispose des résultats de mesures ci-dessous (Bq/L) :

Échantillon	Résultat	Incertitude
A1	130	20
A2	140	10
A3	< 160	

Le tableau des résultats pour le calcul de la moyenne pondérée est le suivant (Bq/L) :

Échantillon	Résultat	Incertitude
A1	130	20
A2	140	10
A3	160	80

Le calcul de cette moyenne s'exprime de la façon suivante :

$$m = \frac{\left(\frac{130}{20^2} + \frac{140}{10^2} + \frac{160}{80^2} \right)}{\left(\frac{1}{20^2} + \frac{1}{10^2} + \frac{1}{80^2} \right)} = 138,0$$

L'incertitude associée est :

$$u_m = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{20^2} + \frac{1}{10^2} + \frac{1}{80^2} \right)}} = 9,0$$

La moyenne pondérée correspondant aux trois mesures A1, A2 et A3 est donc égale à 138,0 ± 9,0 Bq/L.

Arrondissement

L'arrondissement utilisé pour l'expression des résultats sous forme de moyenne est établi de manière à pouvoir disposer de deux chiffres significatifs sur l'incertitude associée au résultat.

Lorsque le troisième chiffre significatif est compris entre 0 et 5, le second est arrondi au chiffre inférieur. Lorsque le troisième chiffre significatif est compris entre 5 et 9, le second est arrondi au chiffre supérieur. Chaque résultat est ensuite exprimé avec le même nombre de chiffres après la virgule que son incertitude.

À titre d'exemple, si l'on dispose du résultat suivant : 23,12548 ± 1,58569 Bq/L :

- La valeur significative retenue sur l'incertitude sera 1,6.
- Le résultat exprimé = 23,1 ± 1,6 Bq/L.

Le détail des règles utilisées pour l'arrondissement des valeurs des mesures et des moyennes est décrit dans le document : « Moyenne, arrondissement et nombre de chiffres significatifs pour les essais interlaboratoires organisés par le STEME/LEI » – Document technique IRSN/STEME/DT/2009 – 07.

Conversion de certains résultats pour une meilleure compréhension

Afin d'exploiter tous les résultats disponibles et de restituer une information synthétique et compréhensible tout en minimisant l'utilisation d'unités diverses, l'IRSN a parfois appliqué des facteurs de conversion aux résultats bruts (afin d'exprimer les résultats en Bq/kg frais à partir d'une valeur obtenue en Bq/kg sec par exemple). En effet, les analyses radiologiques nécessitent des traitements sur les échantillons visant à réduire leur volume : ainsi, les échantillons sont soit séchés en étuve, soit réduits en cendre. Dans la majorité des cas, les facteurs de conversion appliqués ont été calculés sur la base des rapports poids frais/poids sec (PF/PS) ou poids sec/poids de cendre (PS/PC) mesurés sur l'échantillon analysé. Dans certains cas rares, le rapport PF/PS ou PS/PC n'étant pas disponible, une moyenne obtenue sur des échantillons comparables a alors été appliquée pour le calcul.

IV.2 GLOSSAIRE

AASQA : Association agréée de surveillance de la qualité de l'air.

Acro : Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest.

Actinide : famille d'éléments chimiques de numéro atomique égal ou supérieur à l'actinium (numéro atomique 89). Quatre actinides existent à l'état naturel : l'actinium (89), le thorium (90), le protactinium (91) et l'uranium (92). Il existe également des actinides artificiels, ce sont les transuraniens (plutonium, américium, neptunium et curium). On qualifie de « mineurs » ceux que l'on ne sait pas recycler pour produire de l'électricité et de « majeurs » ceux que l'on sait recycler (uranium et plutonium).

Activation : processus par lequel des noyaux atomiques sont rendus radioactifs sous l'action d'un rayonnement (neutrons, gamma, etc.) d'un flux de neutrons ou d'autres particules.

Activité : nombre de désintégrations spontanées de noyaux atomiques par unité de temps. L'unité d'activité est le Becquerel (Bq).

Aérosol : suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides ou les deux, présentant une vitesse de chute négligeable. Dans l'air et dans les conditions normales, ceci correspond à des particules de diamètres inférieurs à 100 micromètres, les plus fines n'ayant que quelques fractions de nanomètres.

AFCN : Agence fédérale de contrôle nucléaire (Belgique).

Afnor : Association française de normalisation.

Alpha (symbole α) : rayonnement composé de noyaux d'hélium 4, fortement ionisant mais très peu pénétrant. Une simple feuille de papier est suffisante pour arrêter sa propagation.

α global (alpha global) : indice de radioactivité représentatif de l'activité des radionucléides émetteurs alpha.

Ancli : Association nationale des comités et commissions locales d'information.

Andra : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

Areva : groupe industriel français intervenant notamment dans le cycle du combustible et la fabrication d'installations nucléaires.

ARS : Agence régionale de santé.

ASN : Autorité de sûreté nucléaire.

Atome : constituant de base de la matière. Il est composé d'un noyau (neutrons + protons) autour duquel gravitent des électrons.

Autorisation de rejet : elle fixe, pour chaque installation, les limites des rejets d'effluents liquides ou gazeux et les conditions de leur contrôle. Elle est accordée par arrêté interministériel, après dépôt d'un dossier soumis aux ministères chargés de l'Industrie, de la Santé et de l'Environnement.

Becquerel (Bq) : unité de mesure, légale et internationale, utilisée pour la radioactivité. Le becquerel (Bq) est égal à une désintégration par seconde. Multiples les plus courants : méga (MBq) pour 1 million de becquerels, giga (GBq) pour 1 milliard de becquerels, téra (TBq) pour mille milliards de becquerels péta (PBq) pour 1 million de milliards de becquerels, ou sous-multiple : milli (mBq) pour 1 millième de becquerel.

Bêta (symbole β) : rayonnement composé d'électrons de charge négative ou positive. Un écran de quelques mètres d'air ou une simple feuille d'aluminium suffit à l'arrêter.

β global (bêta global) : indice de radioactivité représentatif de l'activité des radionucléides émetteurs bêta.

BNEN : Bureau national de normalisation d'équipements nucléaires. Le BNEN est l'un des 31 bureaux de normalisation sectoriels qui composent le système national de normalisation animé par l'Afnor.

Bruit de fond (bdf) : en métrologie, il indique le niveau de comptage induit par l'environnement, la composition des réactifs et l'électronique de l'appareil. Il convient de soustraire ce bruit de fond (utilisation d'un « blanc ») à la valeur de mesure brute pour déterminer l'activité nette contenue dans un échantillon. En termes environnementaux, il représente un niveau d'activité mesurée à un point hors influence de toute source de radioactivité artificielle et dont on ne peut s'affranchir.

CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

Césium (Cs, numéro atomique 55) : métal rare et toxique dont les caractéristiques sont comparables à celles du potassium. Les isotopes 134 et 137 sont des produits de fission radioactifs dont la période radioactive est de 2,2 ans pour le premier et de 30,17 ans pour le second.

Cli : Commission locale d'information.

CNPE : Centre nucléaire de production d'électricité.

Coefficient de dose : dose reçue par unité d'activité par un individu exposé à un (ou des) rayonnement(s). Ce terme est générique et sa définition diffère selon la voie d'atteinte considérée :

- dans le cas d'une exposition interne (inhalation ou ingestion), le coefficient de dose est représenté par la dose (engagée) par unité d'incorporation (DPI). Il s'exprime en Sv/Bq ;
- dans le cas d'une exposition externe à un panache, ou de l'immersion dans l'eau, le coefficient de dose est le débit de dose par unité d'activité volumique. Il s'exprime en (Sv/s)/(Bq/m³) ;
- dans le cas d'une exposition externe à un dépôt au sol en surface, le coefficient de dose est le débit de dose par unité d'activité surfacique. Il s'exprime en (Sv/s)/(Bq/m²) ;

- dans le cas d'une exposition externe à un dépôt au sol en profondeur, le coefficient de dose est le débit de dose par unité d'activité volumique. Il s'exprime en (Sv/s)/(Bq/m³).

Dans le cas d'une exposition interne (DPUI), les coefficients de dose tiennent compte du métabolisme des radionucléides dans l'organisme une fois ingérés ou inhalés, de la nature et de l'énergie des rayonnements émis, de la sensibilité des tissus à la radioactivité (radiosensibilité).

Les coefficients de dose DPUI sont calculés grâce à des modèles décrivant le cheminement des radionucléides dans les différentes parties de l'organisme et à l'utilisation de modèles dosimétriques. Ces modélisations incorporent le dernier état des connaissances en radiobiologie. Les tables donnant les coefficients de doses sont fréquemment mises à jour. Il existe différentes bases de données de coefficients de dose interne et externe dans le monde (base Euratom 96/29, base de la Commission internationale de protection radiologique...) pouvant chacune être privilégiée en fonction de la voie d'atteinte considérée.

Cofrac : Comité français d'accréditation.

Combustible nucléaire : matière fissile constituant la partie active du cœur d'un réacteur. Pour qu'une réaction de fission en chaîne soit possible, l'uranium naturel, mélange comprenant 0,7 % d'uranium 235 – fissile – et 99,3 % d'uranium 238 – non fissile –, a dû être préalablement enrichi à 4 % en uranium 235. Cet uranium est utilisé sous la forme d'oxyde d'uranium, particulièrement stable chimiquement.

Comurhex (Conversion Métal URanium HEXafluorure) : filiale d'Areva, cette société pilote deux sites industriels en France. Le site industriel Comurhex Malvézi assure la première étape de conversion des concentrés uranifères provenant des sites miniers en tétrafluorure d'uranium (UF₄) pour des électriciens du monde entier. Cette transformation se poursuit sur le site industriel de Comurhex Pierrelatte (Drôme) qui transforme le tétrafluore d'uranium en hexafluore d'uranium (UF₆), dernière étape avant l'enrichissement.

Criirad : Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité.

CSP : Code de la santé publique français.

Cycle du combustible : ensemble des opérations industrielles auxquelles est soumis le combustible nucléaire. Ces opérations comprennent notamment : l'extraction et le traitement du minerai d'uranium, la conversion, l'enrichissement de l'uranium, la fabrication du combustible, le traitement des combustibles usés, le recyclage des matières fissiles récupérées pour fabriquer de nouveaux combustibles et la gestion des déchets radioactifs. Le cycle est dit « ouvert » lorsqu'il n'inclut pas le recyclage des combustibles usés, ceux-ci étant alors considérés comme des déchets destinés directement au stockage après leur utilisation dans le réacteur. Par opposition, le cycle du combustible est dit « fermé » s'il comprend le traitement des combustibles usés et le recyclage de matières fissiles issues du traitement.

DDCSPP : Direction départementale de la cohésion sociale et de la protection des populations.

DDPP : Direction départementale de la protection des populations.

Débit de dose : intensité d'irradiation (énergie absorbée par la matière par unité de masse et de temps). L'unité légale est le gray par seconde (Gy/s).

Déchet : tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou, plus généralement, tout bien abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.

Décroissance radioactive ou désactivation : diminution naturelle de l'activité nucléaire d'une substance radioactive par désintégrations spontanées.

Démantèlement : ensemble des opérations d'enlèvement des éléments constitutifs d'une installation nucléaire déclassée (structures et composants divers). Le démantèlement peut être partiel ou total.

DGAL : Direction générale de l'alimentation.

DGCCRF : Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes.

DGPR : Direction générale de la prévention des risques. La DGPR est constituée d'un service des risques technologiques (en charge notamment des risques radiologiques), un service de la prévention des nuisances et de la qualité de l'environnement et un service des risques naturels et hydrauliques.

DGS : Direction générale de la santé.

Dose absorbée : quantité d'énergie absorbée en un point par unité de masse de matière (inerte ou vivante). Elle s'exprime en gray (Gy) : 1 gray correspond à une énergie absorbée de 1 joule par kilogramme de matière.

Dose efficace : somme des doses équivalentes délivrées aux différents organes et tissus d'un individu, pondérées par un facteur propre à chaque organe ou tissu. Elle s'exprime en Sievert (Sv).

Dosimétrie : détermination, par évaluation ou par mesure, de la dose de rayonnements ionisants absorbée par une substance ou un individu.

Dosimètre DTL : dosimètre passif thermo luminescent.

Dosimètre RPL : dosimètre passif radio photo luminescent.

Dreal : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement.

Eau de combustion : eau obtenue en brûlant la matière sèche en présence d'oxygène et en l'absence d'autres sources d'eau pendant la combustion.

Eau de dessiccation : eau obtenue après séchage de l'échantillon (le plus souvent par lyophilisation) permettant d'analyser le tritium libre.

EDF : Électricité de France.

Effluent : tout gaz ou liquide, qu'il soit radioactif ou non, issu des installations.

Électron : particule élémentaire chargée d'électricité négative. Il entre dans la composition des atomes.

Émissaire : exutoire des effluents rejetés par une installation.

EMM : État-major de la Marine nationale.

Entreposage : dépôt temporaire de déchets radioactifs.

Euratom : ce traité, signé à Rome en 1957, institue la Communauté européenne de l'énergie atomique dont la mission consiste à contribuer, par le développement de l'énergie nucléaire, à la mise en commun des connaissances, des infrastructures et du financement, et à assurer la sécurité d'approvisionnement dans le cadre d'un contrôle centralisé.

Eurodif : usine européenne d'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse.

Exposition : l'exposition est le fait d'être exposé aux rayonnements ionisants (exposition externe si la source est située à l'extérieur de l'organisme, exposition interne si la source est située à l'intérieur de l'organisme, etc.).

FBFC : société franco-belge de fabrication de combustibles.

Filière : terme utilisé pour désigner un type de réacteurs nucléaires capables de produire de l'énergie. Il se définit par un ensemble de spécifications communes telles que la nature du combustible, le modérateur, la nature du fluide de refroidissement, etc. On distingue par exemple la filière uranium naturel-graphite-gaz (UNGG), les filières à eau légère, les filières à neutrons rapides (RNR)...

Fissiles : noyaux atomiques susceptibles d'induire la fission, par capture d'un seul neutron. Les noyaux fissiles ont une configuration d'énergie très proche de la fission spontanée.

Fission : éclatement du noyau d'un atome sous l'action de neutrons. Cette réaction est accompagnée d'une émission de neutrons, de rayonnements ionisants et d'un fort dégagement de chaleur. C'est ce dernier qui est utilisé pour créer l'énergie électrique dans une centrale électronucléaire.

Fusion : formation, à partir de deux noyaux légers, d'un noyau lourd. Cette réaction est accompagnée d'un dégagement d'énergie. Des recherches sont en cours pour utiliser l'énergie dégagée par la fusion pour produire de l'électricité.

Gamma (symbole γ) : rayonnement électromagnétique, très pénétrant mais peu ionisant, émis par la désintégration d'éléments radioactifs. Des écrans de béton ou de plomb permettent de s'en protéger.

Gaz rares : gaz dépourvus d'affinité chimique et ne donnant aucun composé. Ce sont l'argon, l'hélium, le krypton, le néon et le xénon.

Gestion des déchets radioactifs : ensemble des dispositions et opérations, réglementaires ou techniques, relatives aux déchets radioactifs, depuis leur production jusqu'à leur stockage inclusivement, destiné à assurer la protection des personnes et de l'environnement.

Gray (Gy) : unité d'énergie transmise à la matière par unité de masse (joule par kg) lors de l'absorption de la dose de rayonnement.

GSIEN : Groupement de scientifiques pour l'information sur l'énergie nucléaire.

Hélium 4 : noyau formé de deux protons et de deux neutrons. Assemblage particulièrement stable, il peut être émis par des noyaux lourds en recherche de stabilité. On l'appelle alors rayon alpha.

ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement.

ILL : Institut Laue – Langevin. Organisme de recherche international situé à Grenoble. Il comprend un réacteur de recherche, le Réacteur à haut flux (RHF, INB n° 67) d'une puissance de 58 MW, utilisé pour produire des faisceaux de neutrons.

INB : Installation nucléaire de base.

INBS : Installation nucléaire de base secrète.

Incertitude de mesure : marge d'imprécision sur la valeur de la mesure d'une grandeur physique.

InVS : Institut national de veille sanitaire.

Iode (I, numéro atomique 53) : corps simple dont les isotopes radioactifs sont présents dans les produits de fission. Tous les iodes radioactifs (131, 132, 133, etc.) ont une durée de vie courte (ex : l'isotope 131 a une période radioactive de 8,02 jours), à l'exception de l'iode 129 dont la période est de près de 16 milliards d'années.

IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

Isotopes : éléments dont les atomes possèdent le même nombre d'électrons et de protons, mais un nombre différent de neutrons. Ils ont le même nom, et les mêmes propriétés chimiques. On connaît actuellement environ 325 isotopes naturels et 1 200 isotopes créés artificiellement.

K : symbole de l'élément potassium. Il est exprimé généralement en mg/L ou mg/kg (milligramme par litre ou par kilogramme).

1 gramme de potassium naturel a une activité (β/γ) de 31 Bq due à la décroissance de l'isotope radioactif de masse 40 (40K).

Limite de détection (LD) : la limite de détection représente la plus petite valeur d'une activité qui peut être décelée par une méthode de mesure dans des conditions définies et pour un degré de confiance choisi.

Matrice : sous-partie d'un compartiment (atmosphérique, terrestre, aquatique continental ou marin). Exemples : eau de pluie, sol, productions végétales, sédiments, mollusques...

MES : Matières en suspension.

MOX (Mixed Oxide) : mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium destiné à la fabrication de certains combustibles nucléaires.

MW : mégawatt.

Neutrinos : particules élémentaires sans charge électrique ni masse connue émises lors d'interactions faibles.

Neutron : particule fondamentale électriquement neutre qui entre, avec les protons, dans la composition du noyau de l'atome. C'est le neutron qui provoque la réaction de fission des noyaux dont l'énergie est utilisée dans les réacteurs nucléaires.

Noyau : partie centrale des atomes, de charge positive. Dix mille fois plus petit que l'atome, il en contient pourtant quasiment toute la masse. Le noyau est un assemblage de protons et de neutrons liés par l'interaction forte.

OMS : Organisation mondiale de la santé.

Opera-Air : Observatoire permanent de la radioactivité de l'environnement dans l'air de l'IRSN regroupant des stations « AS » et « TGD ».

Période radioactive (ou demi-vie) : temps au bout duquel l'activité du radionucléide a diminué de moitié. La période varie d'un radionucléide à l'autre.

Photons : particules élémentaires sans charge ni masse, porteuses de l'interaction électromagnétique.

Plutonium (Pu, numéro atomique 94) : élément chimique transurannique ; l'isotope 239 a une période de 24 110 ans.

Produits de fission : fragments de noyaux lourds produits par la fission nucléaire ou la désintégration radioactive ultérieure de nucléides formés selon ce processus.

Produits d'activation : éléments radioactifs issus de l'irradiation des matériaux situés dans les parties chaudes de réacteur.

Proton : particule élémentaire chargée positivement, constituant le noyau avec le neutron.

Radioactivité : propriété de certains éléments dont les noyaux se désintègrent spontanément pour former d'autres éléments en émettant des rayonnements ionisants.

Radionucléide : isotope radioactif d'un élément. Exemples : ^3H : tritium, isotope radioactif de l'hydrogène. ^{14}C : carbone 14, isotope radioactif du carbone.

Radioprotection : ensemble de mesures destinées à assurer la protection sanitaire de la population et des travailleurs au regard de l'exposition aux rayonnements ionisants.

Radiothérapie : utilisation du pouvoir destructeur de la radioactivité dans le but de détruire des cellules malades, en minimisant les dommages aux cellules saines environnantes.

Radon (Rn) : gaz radioactif omniprésent à la surface de la Terre. Il possède trois isotopes naturels (^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn) descendants des radioéléments présents dans les sols (^{235}U , ^{232}Th et ^{238}U).

Rayonnements : ondes électromagnétiques (gamma) ou particules (alpha, bêta, neutrons) émis lors de la désintégration de radionucléides. Les rayons X sont également des ondes électromagnétiques, mais ils sont émis par des tubes électroniques. Les rayonnements sont dits « ionisants » car ils produisent des ions en traversant la matière. Les rayons gamma, X, ultra-violet, et la lumière visible sont de même nature, mais différent par leur pouvoir de pénétration et leur capacité à créer des ionisations.

Rayonnement ionisant : rayonnement susceptible d'arracher des électrons à la matière.

REP : Réacteur à eau sous pression. Désigne un réacteur nucléaire utilisant l'uranium ou l'oxyde mixte uranium-plutonium comme combustible et de l'eau ordinaire maintenue à haute pression (155 bars, afin d'éviter sa vaporisation) comme fluide caloporteur. Le parc électronucléaire français repose sur l'utilisation de cette filière, qui compte le plus grand nombre d'unités en service dans le monde.

RNM : Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement.

RNR : Réacteur à neutrons rapides.

SCL : Service commun des laboratoires (anciennement les laboratoires de la DGCCRF). Le SCL effectue depuis 1986, date de l'accident de Tchernobyl, des contrôles réguliers sur les niveaux de radioactivité présents dans les produits de consommation.

SET : filiale d'Areva, la Société d'enrichissement du Tricastin est le maître d'ouvrage du projet et l'exploitant de l'usine Georges Besse II. Elle est implantée sur le site du Tricastin.

Seuil de décision (SD) : correspond à une valeur de comptage sur un appareil de mesure pour laquelle on estime que, compte tenu des fluctuations statistiques du bruit de fond, on peut

affirmer avec une probabilité suffisamment élevée de ne pas se tromper qu'un comptage supérieur à cette valeur SD révèle effectivement la présence de radioactivité dans l'échantillon mesuré.

SICN : filiale d'Areva, la Société industrielle de combustible nucléaire produisait les combustibles nucléaires pour la filière uranium naturel graphite-gaz (UNGG) sur deux sites aujourd'hui reconvertis dans des activités non nucléaires (Annecy) ou en cours de démantèlement (Veurey-Voroize).

Sievert (Sv) : unité légale d'équivalent de dose (ou dose efficace) qui permet de rendre compte de l'effet biologique produit par une dose absorbée donnée sur un organisme vivant. L'équivalent de dose n'est pas une quantité physique mesurable mais obtenue par le calcul. Elle dépend de l'énergie transmise aux tissus, du type de rayonnement et du tissu traversé.

Socatri : filiale d'Areva, la Société auxiliaire du Tricastin comprend une installation nucléaire de base (INB 138) et une installation d'Assainissement et de récupération d'uranium (ARU).

Spectrométrie : analyse de l'intensité d'un rayonnement émis par une source en fonction de son niveau d'énergie. Cette méthode permet à la fois d'identifier les radioéléments et de préciser leur « activité ».

SPRA : Service de protection radiologique des armées. Le SPRA est placé sous la responsabilité du directeur central du service de santé des armées.

Station AS : station fixe de prélèvement d'aérosols.

Station TGD : station de prélèvement d'aérosols à « très grand débit » de l'IRSN.

Stérile minier : zone minérale dont l'exploitation est jugée non rentable en raison de sa faible concentration.

Strontium (Sr, numéro atomique 38) : élément alcalino-terreux dont certains isotopes sont très abondants dans les produits de fission, en particulier l'isotope 90, qui se fixe dans les tissus osseux et dont la période radioactive est de 28,15 ans.

TOL : tritium organiquement lié.

Traitement des combustibles usés : ensemble des opérations relatives à l'extraction des matières fissiles et fertiles (uranium et plutonium) des combustibles usés, de façon à permettre leur réutilisation et pour conditionner les différents déchets sous une forme apte à l'entreposage ou au stockage.

Transuraniens : famille des éléments chimiques plus lourds que l'uranium (numéro atomique 92). Les principaux transuraniens sont : Neptunium (93), Plutonium (94), Américium (95), Curium (96).

UNGG : réacteur à uranium naturel gaz graphite. Des réacteurs de ce type ont fonctionné sur les sites des CNPE de Bugey, Chinon et Saint-Laurent-des-Eaux.

U pondéral : teneur massique en uranium dans une matrice, sans distinction de sa composition isotopique. Elle peut être mesurée ou déduite de l'activité (exprimée en Bq) de chacun des isotopes (on parle alors d'« équivalent U pondéral »).

Uranium : élément chimique de numéro atomique 92 et de symbole U, possédant trois isotopes naturels : l'uranium 234, l'uranium 235 et l'uranium 238. L'uranium 235 est le seul nucléide fissile naturel, une qualité qui explique son utilisation comme source d'énergie.

IV.3 SOURCES D'INFORMATION

IRSN

- Résultats de la surveillance de la radioactivité dans l'environnement réalisée par l'IRSN : <http://sws.irsn.fr/sws/mesure/>
- Bases de connaissances : <http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/Pages/Home.aspx>

RNM

- Site du Réseau national de mesure de la radioactivité dans l'environnement : <http://www.mesure-radioactivite.fr/public/>

ASN

- Réglementation applicable aux INB et relative à la protection de l'environnement : <http://www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN/Decisions-de-l-ASN>
- Effets des rayonnements ionisants
<http://www.asn.fr/Informer/Dossiers/Les-effets-des-rayonnements-ionisants>

CEA

- Radioactivité : <http://www.cea.fr/jeunes/themes/la-radioactivite>
- Carbone 14
<http://www.cea.fr/jeunes/mediatheque/animations-flash/climat-environnement/le-cycle-du-carbone>
- Surveillance de l'environnement des sites du CEA
<http://www.cea.fr/le-cea/actualites/surveillance-de-l-environnement-sur-le-centre-de-114280>
<http://www-centre-saclay.cea.fr/fr/Securite-et-environnement-les-rapports-2012>

EDF

- Surveillance de l'environnement
<http://energie.edf.com/nucleaire/environnement/surveillance-de-l-environnement-45713.html>
- Résultats mensuels de la surveillance dans l'environnement
<http://energie.edf.com/nucleaire/environnement/resultats-mensuels-de-la-surveillance-45714.html>

Areva

- Surveillance de l'environnement
Site de La Hague
<http://www.areva.com/FR/activites-1220/le-programme-de-surveillance-de-l-environnement-areva-la-hague.html>
- **Site de Malvés**
<http://www.areva.com/FR/activites-870/la-surveillance-de-l-environnement-de-comurhex-malvesi.html>
- **Site du Tricastin**
<http://www.areva.com/FR/activites-864/la-surveillance-de-l-environnement-du-site-du-tricastin.html>

Ancli (Association nationale des comités et commissions locales d'information)

- <http://www.ancli.fr/>

Acro (Association pour le contrôle de la radioactivité de l'Ouest)

- <http://www.acro.eu.org/>

IV.4 COMITÉ ÉDITORIAL

Coordination éditoriale et réalisation

Service d'étude et de surveillance de la radioactivité dans l'environnement (SESURE) du Pôle radioprotection – environnement – déchets – crise (PRP) de l'Institut.

Pilotage

Valérie BRUNO

Extraction des données

Pascal CUENDET

Donato D'AMICO

Bruno FIEVET

Bruno GULDNER

Malik MENDAS

Hervé THEBAULT

Rédaction

Magali BEGUIN-LEPRIEUR

Thomas BOISSIEUX

Patrick BOUISSET

Christophe DEBAYLE

Fabrice LEPRIEUR

Erwan MANACH

Olivier MASSON

Olivier PIERRARD

Laurent POURCELOT

Sylvie ROUSSEL-DEBET

Lionel SAEY

Damien TOURNIEUX

Cartographie

Fabrice LEPRIEUR

Comité de relecture

Pascal BAILLY-DU-BOIS

Michel BAUDRY

Denis BOULAUD

Pascale DELABBAYE

Marie-Odile GALLERAND

Jean-Christophe GARIEL

Marc GLEIZES

Audrey LEBEAU-LIVE

Guillaume MANIFICAT

Jean-Louis PICOLO

Sylvie ROUSSEL-DEBET

Le programme de surveillance du territoire de l'IRSN nécessite les compétences techniques et les moyens métrologiques de plusieurs laboratoires de l'Institut :

- le laboratoire de surveillance et d'expertise environnementale par échantillonnage ;
- le laboratoire de surveillance atmosphérique et d'alerte ;
- le laboratoire d'études radioécologiques en milieux continental et marin ;
- le laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville ;
- le laboratoire de traitement des échantillons ;
- le laboratoire de mesure nucléaire ;
- le laboratoire de mesure de la radioactivité dans l'environnement ;
- les groupes régionaux du service d'intervention et d'assistance en radioprotection ;
- le bureau d'expertise et d'étude de la radioactivité naturelle.

Les prélèvements d'échantillons effectués dans le cadre de ce programme sont répartis sur l'ensemble du territoire et ne pourraient se faire sans la contribution de nombreux correspondants :

- les services techniques des exploitants nucléaires et des centres de recherches ;
- Météo France ;
- la Marine nationale ;
- des institutions locales et des services déconcentrés de l'État (mairies, préfectures, agences régionales de santé) ;
- l'établissement national des produits de l'agriculture et de la mer (France Agrimer) ;
- la Direction générale de l'alimentation (DGAL) ;
- la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF).

Pour toute information complémentaire, vous pouvez contacter :

IRSN / PRP-ENV / SESURE
31, rue de l'Écluse
BP 40035
78116 Le Vésinet Cedex

IRSN

Siège social
31, avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses

Conception et réalisation : Chromatiques Éditions
Crédits photos couverture :
Laurent Zylberman/Graphix-Images/IRSN,
Arnaud Bouissou/METL-MEDE/IRSN

Imprimé sur papier issu de forêts durablement gérées
et par un imprimeur certifié Imprim'Vert.

Siège social
31, avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

Téléphone
+33 (0)1 58 35 88 88

Courrier
BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

Site Internet
www.irsn.fr

**Pôle radioprotection -
environnement - déchets - crise (PRP)**
**Service d'étude et de surveillance
de la radioactivité
dans l'environnement (SESURE)**
31, rue de l'Écluse
BP 40035
78116 Le Vésinet Cedex

Téléphone
+33 (0)1 30 15 52 42