

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

Bilan de l'état radiologique de l'environnement français en 2009

Synthèse des résultats des réseaux de surveillance de l'IRSN





INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Bilan de l'état radiologique de l'environnement français en 2009

Synthèse des résultats des réseaux de surveillance de l'IRSN



SOMMAIRE

| | | |
|-------------|---|--------|
| | Avant-propos | p. 3 |
| | Rappel des missions de l'IRSN | p. 4 |
| I | La surveillance radiologique de l'environnement | p. 6 |
| I.1 | Pourquoi surveiller la radioactivité dans l'environnement ? | p. 7 |
| I.2 | Qui surveille la radioactivité en France ? | p. 8 |
| I.3 | Le réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement | p. 10 |
| I.4 | Quels sont les objectifs de la surveillance radiologique effectuée par l'IRSN ? | p. 12 |
| I.5 | Comment l'IRSN surveille la radioactivité ? | p. 14 |
| II | La radioactivité naturelle et artificielle en France | p. 26 |
| II.1 | La radioactivité naturelle | p. 27 |
| II.2 | La radioactivité artificielle | p. 30 |
| III | Les résultats de la surveillance générale du territoire | p. 34 |
| III.1 | Le compartiment atmosphérique | p. 35 |
| III.2 | Le milieu continental | p. 43 |
| III.3 | Le littoral | p. 51 |
| III.4 | La surveillance radiologique outre-mer | p. 63 |
| III.5 | Les constats radiologiques régionaux | p. 65 |
| IV | Les résultats de la surveillance des sites du cycle du combustible | p. 74 |
| IV.1 | La surveillance de l'environnement à proximité des sites nucléaires | p. 75 |
| IV.2 | La surveillance de l'environnement autour des anciens sites miniers | p. 77 |
| IV.3 | La surveillance des industries situées en amont dans le cycle du combustible | p. 81 |
| IV.4 | La surveillance des centres nucléaires de production d'électricité | p. 87 |
| IV.5 | La surveillance des industries situées en aval dans le cycle du combustible | p. 107 |
| IV.6 | La surveillance des centres de stockage des déchets | p. 124 |
| V | Les résultats de la surveillance des centres de recherche et des bases navales nucléaires | p. 126 |
| V.1 | Les centres d'études nucléaires du CEA | p. 127 |
| V.2 | Les centres de recherche internationaux | p. 140 |
| V.3 | Les bases navales nucléaires | p. 142 |
| VI | La surveillance des rejets radioactifs des services de médecine nucléaire | p. 146 |
| VI.1 | La médecine nucléaire, les radionucléides utilisés et leur mode d'élimination | p. 147 |
| VI.2 | La surveillance des rejets hospitaliers : le dispositif Téléhydro de l'IRSN | p. 148 |
| VII | Les expertises ponctuelles | p. 150 |
| VII.1 | Dossier Orflam-Plast à Pargny-sur-Saulx (51) | p. 151 |
| VII.2 | Dossier Isotopchim à Ganagobie | p. 153 |
| VII.3 | Dossier site Charvet sur l'île Saint-Denis (93) | p. 155 |
| VIII | Exposition aux rayonnements ionisants de la population en France | p. 156 |
| VIII.1 | Exposition moyenne de la population en France | p. 157 |
| VIII.2 | Comment passer des Becquerels (Bq) de radionucléides d'origine artificielle au Sievert (Sv) ? | p. 158 |
| VIII.3 | Calculs de doses par ingestion correspondant aux activités artificielles environnementales mesurées | p. 159 |
| IX | Diffusion des données de l'IRSN | p. 160 |
| IX.1 | Le site Internet thématique « environnement » de l'IRSN | p. 161 |
| IX.2 | Le site Internet cartographique du RNM | p. 163 |
| IX.3 | La diffusion d'information dans le cadre de traités ou conventions internationaux | p. 163 |
| X | Annexes | p. 164 |
| X.1 | La radioactivité | p. 165 |
| X.2 | Présentation des résultats de ce bilan | p. 170 |
| X.3 | Glossaire | p. 171 |
| X.4 | Références | p. 174 |

AVANT-PROPOS

La surveillance radiologique de l'environnement français est une mission permanente de l'IRSN dans le cadre des politiques publiques de sûreté nucléaire et de radioprotection, participant ainsi à garantir au mieux la protection des populations. Cette mission a pour objectif de contribuer à :

- vérifier que les activités nucléaires sont menées dans le respect des règles de rejet qui s'imposent à elles ;
- s'assurer que l'environnement, dans toutes ses composantes, reste dans un état radiologique satisfaisant qui n'induit pas une exposition excessive des personnes ou des écosystèmes ;
- détecter aussi rapidement que possible toute élévation anormale de la radioactivité pouvant résulter d'un accident radiologique ou nucléaire survenu en France ou à l'étranger.

Pour y répondre, l'IRSN met en œuvre deux natures de dispositifs :

- 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 (aérosols, sédiments, herbes, mousses, mollusques...).

Les échantillons sont mesurés dans les laboratoires accrédités de l'Institut.

Répartie sur la totalité du territoire, l'implantation des stations de surveillance prend aussi en compte la présence des sources potentielles des rejets radioactifs telles que les installations nucléaires.

Ce rapport présente les données acquises en 2009 dans le cadre du suivi par l'IRSN des niveaux de radioactivité sur le territoire national, en dehors de la Polynésie française dont les résultats font l'objet d'un rapport spécifique.

La présentation des résultats se décline selon un découpage thématique :

- soit par type d'installation à l'origine de rejets radioactifs (Centre nucléaire de production d'électricité – CNPE, centre de retraitement, service de médecine nucléaire...);
- soit par compartiment environnemental surveillé (air, eaux, milieu biologique...).

Chaque partie peut être consultée indépendamment des autres. Compte tenu du grand nombre de données acquises tout au long de l'année, 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 des sites de même nature, des différences peuvent apparaître dans les plans de surveillance appliqués, ou pour des raisons géographiques, historiques ou à titre d'étude spécifique. Pour retrouver 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.irsln.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.

En 2009, près de 23 000 prélèvements ont été réalisés sur le territoire et ont donné lieu à plus de 27 000 analyses. Les réseaux de télémessure de la radioactivité ont, quant à eux, produit quelques 17 millions de mesures.

D'une manière générale, un marquage de l'environnement par des radionucléides artificiels est mis en évidence à proximité de sources de rejet connues (activités de l'industrie nucléaire, hospitalières) et également 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). Du point de vue qualitatif, les niveaux de radioactivité mesurés par le dispositif de surveillance de l'IRSN en 2009 restent faibles et dans la gamme habituellement observée ces dernières années.

La sixième édition de ce bilan annuel 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 : démarrage des constats radiologiques territoriaux dans la vallée du Rhône et dans le quart sud-ouest, redéploiement de la surveillance du littoral et des denrées en collaboration avec la Direction générale de l'alimentation (DGAL) et la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) avec qui l'IRSN a développé un programme de surveillance optimisé. Elle voit également apparaître une nouvelle partie relative aux expertises ponctuelles menées par l'IRSN sur les sites pollués.

L'édition 2009 du bilan se veut encore améliorée sur le plan de la présentation et sur le plan de la pédagogie avec davantage de focus et une partie dosimétrie densifiée. Les améliorations apportées au fil des années sont une illustration de la politique qualité de l'IRSN dans toutes ses dimensions, d'abord de professionnalisme, mais aussi pour le bénéfice de ses clients institutionnels et de la société.

Ainsi, l'IRSN se prépare dès à présent à la réalisation pour l'an prochain d'un bilan radiologique élargi à l'ensemble des données déclarées au Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM), mission confiée à l'Institut par l'article 6 de la décision homologuée de l'ASN n° 2008-DC-099.

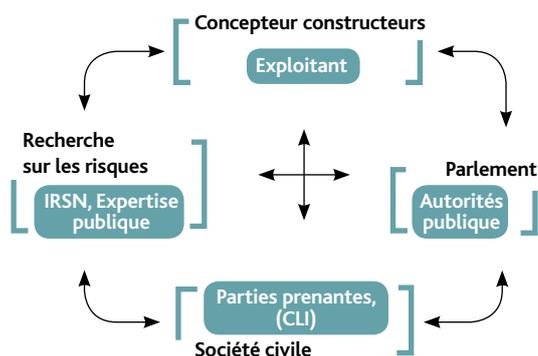
Je vous souhaite une agréable lecture du bilan 2009, en espérant qu'il réponde à vos attentes.

Jacques Repussard
Directeur Général

RAPPEL DES MISSIONS DE L'IRSN

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire a été créé par la loi 2001-398 du 9 mai 2001. Expert public des risques, l'IRSN concourt aux politiques publiques en matière de sûreté nucléaire et de protection de la santé et de l'environnement au regard des rayonnements ionisants. Il interagit avec tous les acteurs concernés par ces politiques.

En France, la prévention des risques nucléaires repose sur quatre piliers complémentaires :



- les exploitants sont responsables de la sûreté de leurs installations nucléaires. Ils doivent démontrer la pertinence des moyens techniques et organisationnels mis en œuvre à cet effet (dossiers de sûreté, études d'impact des rejets) ;
- les autorités publiques déterminent les politiques de sûreté nucléaire et de radioprotection. Elles organisent et mettent en œuvre le contrôle ;
- l'IRSN, pôle public d'expertise sur les risques nucléaires, évalue pour les différentes autorités compétentes, les dossiers fournis par les exploitants. Il analyse le fonctionnement des installations et l'exposition des hommes et de l'environnement aux rayonnements. L'expertise de l'IRSN repose sur ses activités de recherche, conçues le plus souvent dans un cadre international ;
- les Commissions locales d'information (CLI) rassemblent les parties prenantes concernées par une installation nucléaire donnée et forment un organe d'accès à l'information et de vigilance autour des enjeux de sûreté, de protection de la santé et de l'environnement.

L'IRSN est un Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) sous la tutelle conjointe du ministre de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, du ministre de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi, du ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, du ministre de la Défense et du ministre de la Santé et des Sports.

Son **budget** (301 M€ en 2009) est financé à hauteur de 237 M€ par une subvention inscrite au budget du ministère de l'Écologie, dans le cadre de la mission LOLF « recherche et enseignement supérieur », programme « recherche sur les risques environnementaux », action « risques nucléaires et radiologiques ». Cette subvention est complétée par des financements publics ou privés, nationaux, européens ou internationaux dédiés à des programmes de recherche ou d'expertise spécifiques. L'IRSN rassemble près de 1 700 salariés, dont plus d'un millier d'experts et de chercheurs.

Ses **ressources** sont consacrées :

- pour 45 % à la recherche. Les programmes les plus lourds, nécessitant des réacteurs nucléaires de recherche ou des moyens conséquents (comportement des combustibles, simulations d'accidents, etc.), sont mutualisés au niveau international ;
- pour 47 % à l'appui technique aux pouvoirs publics et aux autorités ;
- pour 8 % aux prestations d'expertises et d'études réalisées dans un cadre contractuel.

L'IRSN couvre les domaines d'activités suivants :

- la sûreté nucléaire : réacteurs, cycle du combustible, déchets, applications médicales ;
- la sûreté des transports de matières radioactives et fissiles ;
- la protection des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants : l'IRSN gère les données d'exposition individuelle d'environ 250 000 travailleurs ;
- la protection de la population et de l'environnement contre les risques liés aux rayonnements ionisants ;
- la protection et le contrôle des matières nucléaires ;
- la protection des installations nucléaires et transports de matières radioactives et fissiles contre les actes de malveillance.

L'IRSN est un acteur de la transparence nucléaire :

- l'information du public fait partie des missions de l'IRSN. Son portail Internet (www.irsn.fr) propose une large palette d'informations adaptées à différents types de publics, plus de 1 700 000 pages vues en 2009 ;
- l'IRSN anime une exposition itinérante sur le thème de la maîtrise des risques nucléaires. Il contribue à l'enseignement sur ces sujets ;
- l'IRSN a signé un accord-cadre avec la fédération des CLI, l'Association nationale des commissions et comités locaux d'information (ANCCLI), afin de rendre son expertise accessible aux parties prenantes et ainsi faciliter la compréhension de dossiers techniques qui sont souvent complexes ;
- l'IRSN anime, sur demande des pouvoirs publics, des groupes d'expertise pluraliste sur des thèmes potentiellement générateurs de controverse au sein de la société.

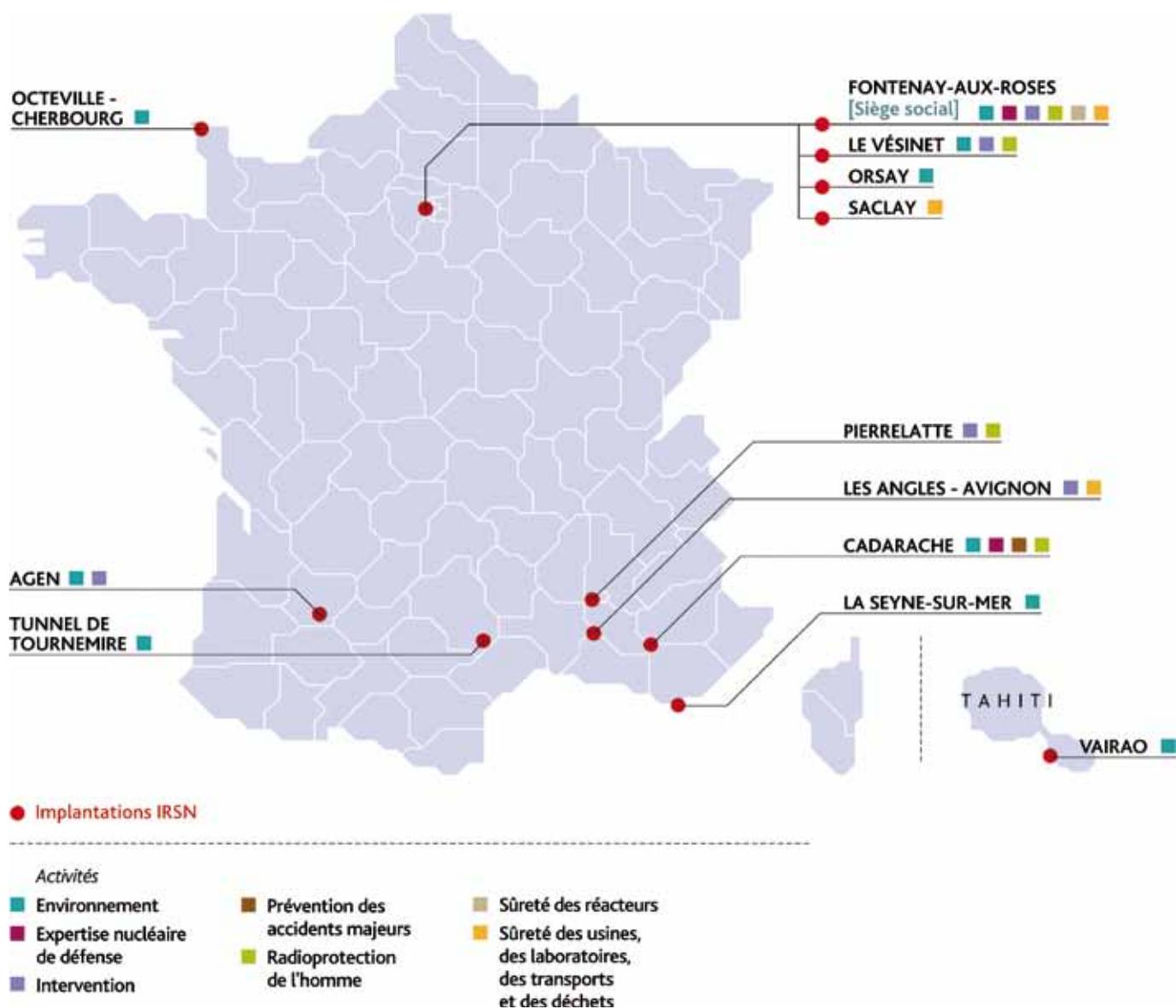


FIGURE 1 Implantation des sites de l'IRSN.



I

LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

- I.1 Pourquoi surveiller la radioactivité dans l'environnement ?
- I.2 Qui surveille la radioactivité en France ?
- I.3 Le réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement
- I.4 Quels sont les objectifs de la surveillance radiologique effectuée par l'IRSN ?
- I.5 Comment l'IRSN surveille la radioactivité ?

■ I.1 POURQUOI SURVEILLER LA RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT ?

Les activités industrielles et humaines mettant en œuvre des substances radioactives 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 dans des conditions définies et contrôlées, par des autorisations de rejet délivrées par les autorités compétentes de l'État, après évaluation préalable de l'impact prévisible sur les milieux et sur la santé des populations. La réglementation applicable aux rejets autorisés a évolué au fil des années, notamment pour ce qui concerne les limites de rejets qui ont été régulièrement revues à la baisse ;
- de la diffusion, notamment par des eaux d'infiltration, de radionucléides contenus dans des déchets 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 dans le sol, du fait de la défaillance de la sûreté des installations nucléaires (ex : accident de Tchernobyl) ;
- de la persistance dans l'environnement de radionucléides à vie longue (demi-vie 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 (en particulier le césium 137) 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 tritium (³H), du carbone 14 (¹⁴C), du potassium 40 (⁴⁰K), de l'uranium et du thorium et de leurs descendants radioactifs.

- L'IRSN, acteur majeur de la surveillance
- 23 000 prélèvements sur l'ensemble du territoire
- 27 000 analyses
- 178 sondes de télésurveillance

■ 1.2 QUI SURVEILLE LA RADIOACTIVITÉ EN FRANCE ?

L'INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (IRSN)

L'IRSN contribue à l'évaluation de l'état radiologique de l'environnement de trois manières :

– **en réalisant des expertises au titre de l'appui technique fourni aux autorités compétentes** : l'ASN ou le DSND, les préfets et les DREAL. Ces expertises concernent notamment l'analyse des demandes d'autorisation de prélèvements d'eau et de rejets d'effluents 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 ou les DREAL ;

– **en contribuant à la surveillance radiologique du territoire**, conformément aux missions qui lui sont confiées par 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 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 (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.

Les principaux résultats des mesures réalisées par l'IRSN sont diffusés sur son portail Internet dédié à la radioactivité de l'environnement (<http://environnement.irsn.fr>).

L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (ASN)

Dans le champ de ses attributions définies par la loi relative à la transparence et à la sécurité nucléaire (dite « loi TSN »), l'ASN prend des décisions réglementaires à caractère technique s'appliquant aux exploitants d'installations nucléaires et, dans ce cadre, fixe en particulier des prescriptions en matière de surveillance de la radioactivité sur les sites nucléaires ne relevant pas de la Défense, ainsi que dans leur environnement. Ces prescriptions sont définies dans des décisions homologuées (et antérieurement dans des arrêtés ministériels) prises à l'issue de l'instruction des DARPE faites par les exploitants nucléaires. L'ASN assure le contrôle du respect de ces prescriptions, notamment en examinant les registres de surveillance produits par les exploitants et en réalisant des inspections. Dans le cas des installations et activités nucléaires intéressant la Défense, ces attributions relèvent soit du ministre chargé de l'Industrie, soit du ministre de la Défense (secteur militaire), qui dispose d'un délégué (DSND) chargé de leur proposer les règles applicables à ces installations et d'en assurer le contrôle.

Par ailleurs, l'ASN délivre des agréments aux laboratoires réalisant des mesures de radioactivité dans l'environnement, notamment dans le cadre de la surveillance réglementaire des installations nucléaires. Enfin, elle apporte son concours au ministère de la Santé pour la définition des dispositions techniques applicables au contrôle sanitaire de la qualité radiologique des eaux destinées à la consommation humaine, ainsi que pour l'agrément des laboratoires réalisant les mesures de contrôle.

LES EXPLOITANTS D'INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

Les exploitants d'installations nucléaires ont la responsabilité d'assurer la surveillance des effluents rejetés par leurs installations ainsi que de l'environnement de celles-ci, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des sites nucléaires. D'une manière générale, cette surveillance est encadrée par des prescriptions réglementaires fixées dans les DARPE, qui imposent la réalisation, par les exploitants, d'un programme de surveillance régulière de l'environnement de leurs sites (surveillance dite « réglementaire »). Les mesures de radioactivité des échantillons prélevés dans ce cadre doivent être réalisées par des laboratoires agréés.

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.

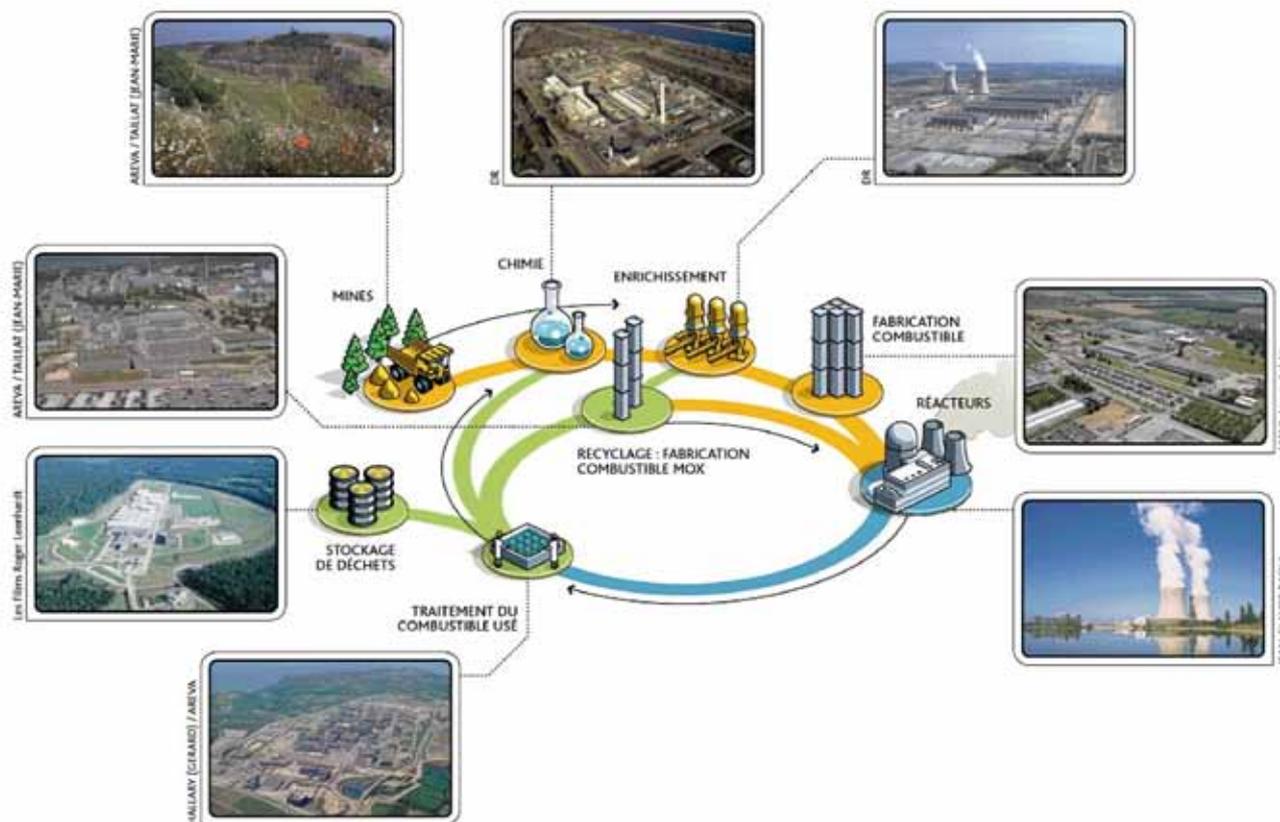


FIGURE 1.1 Schéma simplifié du cycle du nucléaire.

Quelles sont les principales installations du cycle du combustible en France ?

Toutes les installations du cycle du combustible donnent lieu à une surveillance systématique de leur environnement.

Ce cycle regroupe les étapes industrielles suivantes (Figure 1.1) :

- extraction de l'uranium des mines (anciens sites miniers dont la gestion est actuellement confiée à AREVA) ;
- concentration et conversion des composés d'uranium (Comurhex Malvési 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 (Marcoule) ;
- fabrication et assemblage du combustible (FBFC Romans-sur-Isère) ;
- utilisation dans les réacteurs des centres nucléaires de production d'électricité (EDF, 22 sites dont 19 en exploitation comportant 58 réacteurs à eau pressurisée) ;
- traitement du combustible usé déchargé des réacteurs et recyclage (AREVA La Hague, CEA Marcoule) ;
- traitement et stockage des déchets issus ou non du retraitement (ANDRA, centres de la Manche, de Soulaïnes et de Morvilliers).

Sept centres du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) ainsi que l'Institut de recherche Laue-Langevin (ILL) sont autorisés à rejeter des effluents radioactifs sous forme gazeuse ou liquide. Ces centres de recherche sont aussi soumis à une surveillance de leur environnement.

Trois ports militaires de métropole abritent des bases navales nucléaires. Ces installations nucléaires présentent la spécificité d'être intégrées au sein d'agglomérations importantes (Toulon, Brest, Cherbourg). 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.

LES DIRECTIONS MINISTÉRIELLES ET LES SERVICES DE L'ÉTAT EN CHARGE DE CONTRÔLES SANITAIRES

Ces directions et services ont une mission générale de contrôle sanitaire des aliments (denrées animales et végétales, eau potable) et des animaux destinés à l'alimentation, qui nécessite la recherche d'agents chimiques, physiques et biologiques pouvant engendrer des risques pour l'homme, parmi lesquels figurent les substances radioactives.

La Direction générale de l'alimentation (DGAL) réalise tous les ans un plan de surveillance de la contamination éventuelle des denrées alimentaires (lait et produits laitiers, œufs, viande, poisson, produits de la mer) par des radio-nucléides. L'objectif de ce plan est de contrôler la qualité des denrées du point de vue radiologique en particulier des produits alimentaires en provenance de zones voisines d'installations nucléaires. Les prélèvements sont réalisés par département, par les agents des Directions départementales des services vétérinaires (DDSV).

La Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) effectue depuis 1986, date de l'accident de Tchernobyl, des contrôles réguliers du niveau de contamination radioactive des produits de consommation. Ces contrôles portent principalement sur les denrées alimentaires d'origine végétale. Chaque année, plusieurs centaines d'échantillons sont ainsi prélevés sur le marché intérieur au stade de la commercialisation des produits.

Dans le domaine de l'eau, la Direction générale de la santé (DGS) veille à protéger la population dans les différents usages de l'eau (eaux potables, eaux de loisirs, eaux chaudes sanitaires, eaux conditionnées, eaux usées...). Dans le cadre du contrôle sanitaire qu'elles assurent en application du code de la santé publique, les Directions départementales des affaires sanitaires et sociales (DDASS, devenues Agences régionales de santé : ARS) exercent, depuis 2005, des contrôles réguliers de la qualité radiologique des eaux destinées à la consommation humaine.

LES ASSOCIATIONS

En France, différentes associations loi 1901 interviennent également dans le domaine de la surveillance de la radioactivité dans l'environnement.

L'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest (ACRO) et la Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité (CRII-RAD), créées en 1986 au lendemain de l'accident de Tchernobyl, disposent de leurs propres laboratoires de mesure de la radioactivité et diffusent le résultat des contrôles qu'elles effectuent. Ces associations sont sollicitées principalement par des collectivités territoriales, des associations écologistes, des laboratoires et des associations de producteurs et de consommateurs.

Les Associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air (AASQA) exploitent et développent un réseau national de mesures de la qualité physico-chimique de l'air, sous l'égide du ministère chargé de l'Environnement. Le dispositif de surveillance de la qualité de l'air comporte 40 associations agréées qui constituent le dispositif ATMO. L'ADEME assure une mission de coordination technique de ce dispositif, en liaison avec le ministère chargé de l'Environnement. Quelques AASQA disposent

de capteurs dédiés au suivi de la radioactivité dans l'environnement. Cela dépend essentiellement de la présence ou non d'installations nucléaires dans la région. Une dizaine d'AASQA sont ainsi équipées d'une ou plusieurs balises automatiques de mesure en continu de la radioactivité atmosphérique.

En application d'une circulaire du premier ministre du 15 décembre 1981, des Commissions locales d'information (CLI) ont été mises en place dans les années 1980 autour de la plupart des installations nucléaires, à l'initiative des conseils généraux. La loi TSN a conforté l'existence des CLI en leur donnant un statut législatif. Son article 22 prévoit la création d'une CLI auprès de chaque installation nucléaire de base (une CLI pouvant être commune à plusieurs installations proches). La mission des CLI est une mission générale de suivi, d'information et de concertation en matière de sûreté nucléaire, de radioprotection et d'impact des activités nucléaires sur les personnes et l'environnement. La CLI reçoit les informations nécessaires à sa mission de la part de l'exploitant, de l'ASN et des autres services de l'État. Elle peut faire réaliser des expertises ou faire procéder à des mesures relatives aux rejets de l'installation dans l'environnement.

■ 1.3 LE RÉSEAU NATIONAL DE MESURES DE LA RADIOACTIVITÉ DE L'ENVIRONNEMENT

Afin de centraliser les informations sur la radioactivité de l'environnement en France et faciliter l'accès de tous les publics, professionnels ou non, aux résultats des mesures tout en renforçant l'harmonisation et la qualité des mesures effectuées par les laboratoires agréés, le site Internet du Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM) a été ouvert le 2 février 2010.



Prévu par le code de la santé publique, le RNM est développé sous l'égide de l'ASN en collaboration avec l'IRSN et en partenariat avec les principaux acteurs du réseau dont le ministère de la Santé, le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, la Marine nationale, les grands exploitants nucléaires EDF, ANDRA, AREVA, CEA, les agences sanitaires (Afssa, InVS), les associations de protection de l'environnement, notamment l'ACRO.

Les mesures rassemblées dans le RNM sont essentielles pour l'évaluation des impacts des substances radioactives sur la santé, sur l'environnement et sur les ressources d'intérêt économique (notamment l'eau et l'agriculture).

QUI TRANSMET LES MESURES DE RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT AU RÉSEAU NATIONAL ?

Conformément à l'article 1333-11 du code de la santé publique, les résultats de mesures de la radioactivité de l'environnement regroupés au sein du réseau national sont ceux obtenus :

1. Dans le cadre de la mise en œuvre de dispositions législatives ou réglementaires contribuant à l'évaluation des doses auxquelles la population est exposée, en particulier les résultats de la surveillance de l'impact des activités nucléaires sur l'environnement : les exploitants nucléaires qui effectuent des mesures de radioactivité de l'environnement en vertu de dispositions législatives ou réglementaires sont donc tenus de faire réaliser ces mesures par des laboratoires agréés ou par l'IRSN et d'en transmettre les résultats pour diffusion sur le réseau national.

2. Par l'Autorité de sûreté nucléaire, les collectivités territoriales, les services de l'État ou les établissements publics qui font effectuer des mesures par des laboratoires agréés ou par l'IRSN.

3. Par toute association ou tout autre organisme privé qui fait effectuer des mesures par des laboratoires agréés ou par l'IRSN dès lors que la transmission des résultats au réseau est demandée par l'organisme détenteur de ces résultats.

LE SYSTÈME D'INFORMATION DU RÉSEAU NATIONAL

Chaque producteur de mesures de radioactivité envoie, par un mode de transfert sécurisé via Internet, ses données formatées selon un protocole d'échange d'informations qui a été défini en commun (Figure I.2). Ces envois alimentent la base de données centrale du réseau national qui a déjà réceptionné près de 250 000 résultats de mesures depuis sa mise en service en janvier 2009, avec une fréquence d'actualisation importante (en moyenne 15 000 mesures sont ajoutées chaque mois).

Plus de 40 % des résultats transmis au RNM sont issus des réseaux de surveillance de l'IRSN. Cette base de données est exploitable par un système d'information qui permet de restituer l'ensemble des informations au public et aux experts, notamment grâce à un portail Internet cartographique (www.mesure-radioactivite.fr).

Le réseau national s'inscrit dans une démarche de progrès novatrice visant d'une part à s'assurer de la qualité des mesures de radioactivité fournies par des laboratoires agréés, et d'autre part à mieux informer les citoyens sur l'état radiologique de l'environnement

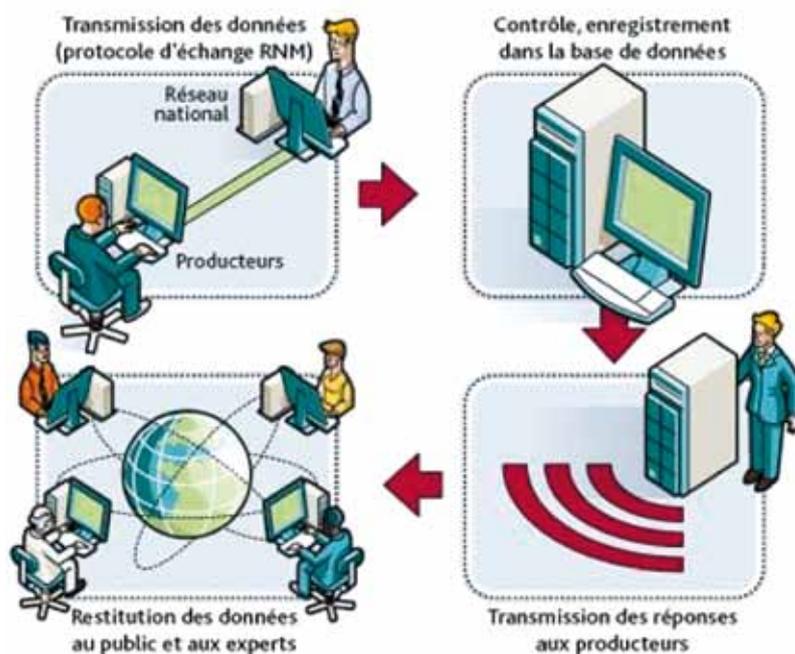


FIGURE I.2 Schéma d'organisation du système d'information du RNM.

par une pluralité des sources d'information. L'ouverture du site Internet du réseau national constitue une étape importante de la démarche de transparence visant à répondre à une demande sociétale de plus en plus forte en France.

Le système d'information du réseau national continuera d'évoluer afin de prendre en compte non seulement les améliorations techniques nécessaires à son bon fonctionnement, mais également les attentes et les constats exprimés par les internautes vis-à-vis de la restitution des mesures.

■ 1.4 QUELS SONT LES OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE EFFECTUÉE PAR L'IRSN ?

Il est nécessaire de surveiller et d'étudier le devenir des substances radioactives dans l'environnement, afin de connaître leur impact éventuel sur la santé de l'homme, de l'environnement et sur les ressources d'intérêt économique (notamment l'eau et l'agriculture). La surveillance radiologique du territoire français est une des missions fondamentales de l'IRSN¹. Celle-ci est indissociable de celles 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 à trois objectifs principaux et complémentaires :

– **vérifier que les activités nucléaires sont menées dans le respect des règles de rejet qui s'imposent à elles, en s'assurant de l'absence de contamination environnementale due aux rejets déclarés.**

Afin de déceler d'éventuels « marquages discrets » provenant des rejets chroniques 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 d'expertise opérationnels qu'il déploie dans ce cadre, l'Institut contribue à l'évolution de la réglementation dans ce domaine ;

– **s'assurer que le territoire, dans toutes ses composantes, reste dans un état radiologique satisfaisant qui n'induit pas d'exposition excessive des personnes ou des écosystèmes.**

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

– **détecter rapidement et caractériser toute élévation de radioactivité pouvant résulter d'un incident ou d'un accident survenant dans une installation nucléaire.**

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. Ainsi, l'IRSN est en mesure d'alerter précocément et de conseiller pour la gestion de crise qui en découle.

¹ – Voir le 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... ».



FIGURES 1.3

Ci-dessus : sonde de télé-surveillance.

Ci-contre et ci-dessus à droite :

prélèvements de végétaux, de sédiment et d'eau.





■ 1.5 COMMENT L'IRSN SURVEILLE LA RADIOACTIVITÉ ?

DISPOSITIFS MIS EN ŒUVRE À L'IRSN ET ÉVOLUTIONS

Pour mener à bien sa mission de surveillance radiologique de l'environnement, l'IRSN exploite un ensemble de stations de prélèvement et de mesure ayant un rôle de « sentinelle » réparties sur l'ensemble du territoire national, en privilégiant l'environnement proche des principaux sites nucléaires.

Cette surveillance est fondée sur un principe de mesure qui distingue :

- **des réseaux de prélèvement d'échantillons** suivant une fréquence régulière, mesurés *a posteriori* en laboratoire, qui ont pour objet de suivre l'état radiologique des différents compartiments de l'environnement. Ces échantillons concernent des matrices variées : les aérosols principalement, mais aussi les eaux de pluies, les eaux de surface (fleuves et eau de mer), les indicateurs biologiques (mousses, algues), les denrées alimentaires (lait et produits laitiers, viande, poisson, mollusques, crustacés, céréales...);
- **des réseaux de télésurveillance en continu** de la radioactivité de l'air principalement, et de l'eau des principaux fleuves le long desquels sont implantées des installations nucléaires.

En complément de cette surveillance permanente de la radioactivité, l'IRSN mène depuis de nombreuses années des études ou des expertises radioécologiques aussi bien dans l'environnement des sites nucléaires que dans des territoires non soumis à l'influence directe des installations. Ces études ont pour objectifs de caractériser aussi précisément que possible l'état radiologique des milieux, d'expliquer l'origine et le devenir des radionucléides décelés, ainsi que, pour certaines d'entre elles, d'évaluer les doses reçues par les personnes susceptibles d'être exposées. Elles sont engagées soit de la propre initiative de l'Institut, soit à la demande d'exploitants ou des autorités.



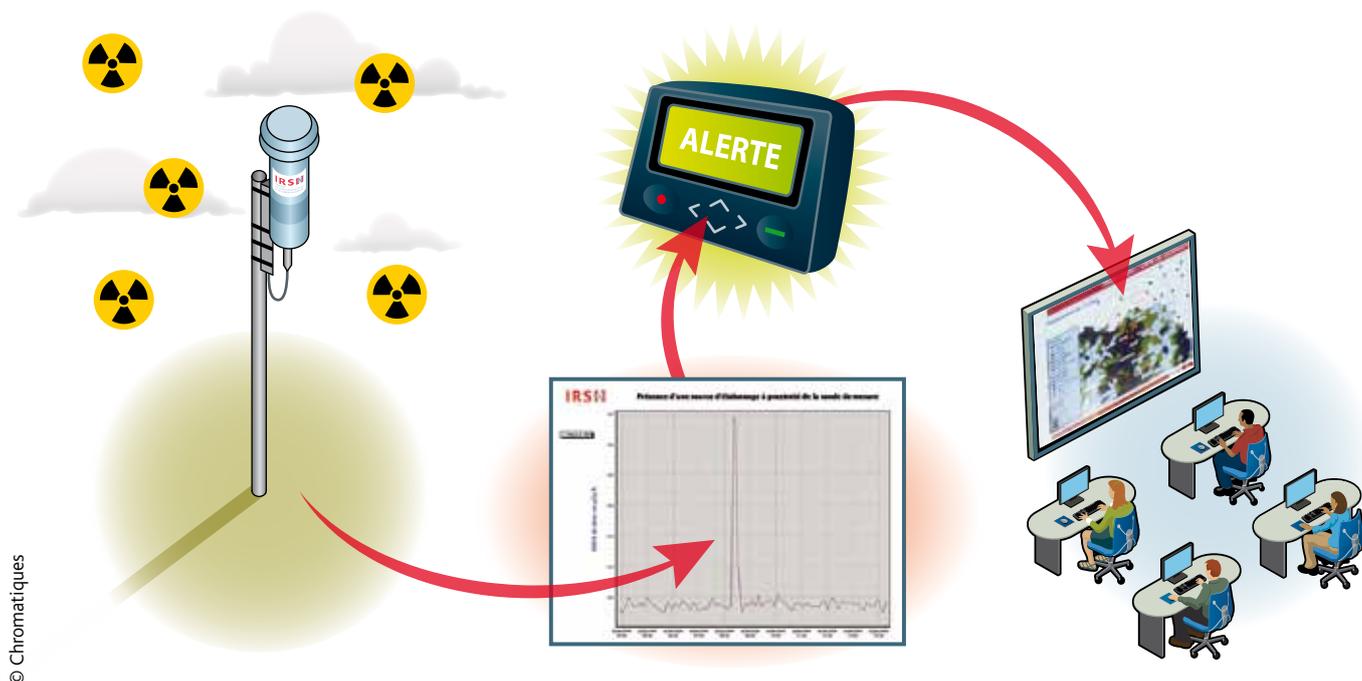
FIGURE I.4 Campagne de prélèvement autour d'une installation nucléaire.

Ainsi, l'IRSN bénéficie d'une solide expérience en matière de connaissance de l'état radiologique de l'environnement. Pour autant, la question de la surveillance de l'environnement n'est pas dépourvue de défis nouveaux, liés aux évolutions techniques et aux changements de contexte, notamment en termes de transparence :

- d'une part, les chroniques de mesures de la radioactivité en France montrent une tendance générale à la 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 ;
- d'autre part, des évolutions techniques sont nécessaires pour répondre à des demandes nouvelles des autorités et des acteurs de la société (meilleure capacité de détection), ainsi qu'au vieillissement des équipements en place (perte progressive de leur fiabilité).

Ce contexte a conduit l'IRSN à définir un programme de modernisation et de redéploiement des dispositifs de surveillance selon les axes stratégiques suivants :

- **une orientation plus marquée du dispositif de surveillance générale du territoire vers la protection des populations** et les composantes les plus sensibles de l'environnement et de l'économie (agriculture notamment) ;
- **le maintien à jour de la connaissance sur l'état radiologique de l'environnement**, en systématisant la réalisation périodique de constats radiologiques régionaux ; il s'agit de disposer d'états radiologiques de référence représentatifs des différentes parties du territoire et de leurs composantes (air, eaux, sols et cultures), en veillant à associer des acteurs et parties prenantes locaux pour à la fois discuter des plans de prélèvements et de mesures et analyses à mettre en œuvre, mais également pour contribuer à la réalisation opérationnelle de ces constats ;
- **la modernisation et le redéploiement de l'ensemble des réseaux de surveillance** à la fois autour des sites nucléaires et sur l'ensemble du territoire national, notamment afin de traiter l'obsolescence de certains équipements due à leur ancienneté et de disposer d'une couverture optimale du territoire en situation de contamination accidentelle ;
- **la mise en place d'une surveillance plus flexible**, ce qui concerne aussi bien les équipements que les personnels appelés à les exploiter ou à les maintenir. Elle peut être considérée comme l'un des critères d'adaptabilité et de réactivité de l'Institut, et vise à doter l'IRSN d'une capacité :
 - à faire face à des situations imprévues de pollution radioactive exigeant rapidement une évaluation, notamment en cas de crise environnementale ou de situation post-accidentelle ;
 - à mettre en place des dispositifs de surveillance dans le cadre d'opérations programmées, périodiques ou non, permettant de compléter et d'actualiser la connaissance de l'état radiologique de l'environnement, d'expliquer les éventuels marquages de l'environnement décelés



© Chromatiques

FIGURE 1.5 Sonde Téléray déclenchant une alerte en salle de télésurveillance de l'IRSN.

au voisinage des activités nucléaires actuelles ou passées et, le cas échéant, à investiguer des situations jugées inhabituelles ou anormales afin d'en évaluer l'impact réel ;

- **le développement de partenariats, locaux ou nationaux**, avec des organismes pouvant apporter un concours à l'IRSN, en vue d'optimiser et, s'il y a lieu, de mutualiser certaines activités de surveillance ;
- **l'amélioration de l'appropriation et de la compréhension, par le public, des résultats de la surveillance menée par l'IRSN**, en poursuivant le développement de leur mise à disposition, notamment sur les sites Internet (sites de l'IRSN et du Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement, sites partenaires), mais aussi en développant le dialogue avec les acteurs locaux sur la restitution des résultats.

Ce programme de modernisation et de redéploiement des réseaux de surveillance de l'environnement de l'Institut, engagé progressivement à partir de 2008, s'effectue dans un cadre d'échange technique et stratégique avec les autres acteurs français de la surveillance (ASN, services de l'état, exploitants), les parties prenantes (CLI, collectivités locales, etc.), ainsi que nos homologues étrangers. Il se poursuivra encore sur plusieurs années.

LES RÉSEAUX DE TÉLÉMESURE DE LA RADIOACTIVITÉ

Les deux réseaux automatisés de télémessure de la radioactivité de l'IRSN sont constitués de 170 sondes différentes analysant en continu la radioactivité ambiante de l'eau ou de l'air :

– **Téléray** : réseau dédié à la surveillance en continu du rayonnement gamma ambiant de l'air, avec une fonction d'alerte en cas d'élévation inhabituelle de la radioactivité mesurée (Figure 1.5) ;

– **Hydrotéléray** : réseau dédié à la surveillance en continu de la radioactivité des principaux fleuves, en aval de toutes les installations nucléaires et avant leur sortie du territoire national.

TABLEAU 1.1 Nombre de mesures collectées en 2009 par les réseaux de télémessure de la radioactivité sur le territoire français.

| Réseau | Nombre de mesures par an |
|---------------------------|--------------------------|
| Téléray (163 stations) | 17 000 000 |
| Hydrotéléray (7 stations) | 30 000 |

Chaque sonde effectue l'enregistrement de la radioactivité (débit de dose ou spectrométrie gamma) de manière autonome et en continu. Un serveur centralisé reçoit automatiquement, et en temps réel, les données de ces deux réseaux et les stocke (Tableau 1.1). 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 des réseaux s'effectuent à partir d'un central de télésurveillance situé sur le site IRSN du Vésinet.

LE PLAN DE MODERNISATION DU RÉSEAU DE TÉLÉMESURE TÉLÉRAY

Le projet de modernisation du réseau Téléray a débuté en 2007 avec la mise en place de la plate-forme d'expérimentations ARGOS, permettant l'évaluation technique de logiciels et de sondes. Les résultats de cette première phase ont permis de déterminer que les performances des compteurs proportionnels existant sur le marché étaient plus en adéquation avec le besoin de l'IRSN que celles des compteurs Geiger-Müller utilisés jusqu'à présent.

L'année 2009 a vu la poursuite du développement d'un nouveau système de gestion des données (supervision SPARTE), destiné à faciliter leur traitement et à automatiser leur diffusion.

Parallèlement, une étude du redéploiement des sondes sur l'ensemble du territoire a permis de confirmer l'intérêt d'un renforcement de la surveillance aux abords des installations nucléaires (dans une zone allant de 10 à 30 km environ), et d'une homogénéisation de l'implantation nationale des sondes (à minima une sonde par département). Le nombre de sondes du réseau Téléray devrait ainsi passer de 163 à environ 420 en 2015. En 2009, l'Institut a engagé l'acquisition d'un parc de sondes de mesures de nouvelle génération.

D'autre part, la transmission des données entre les sondes et le serveur central, actuellement basée sur le réseau téléphonique,

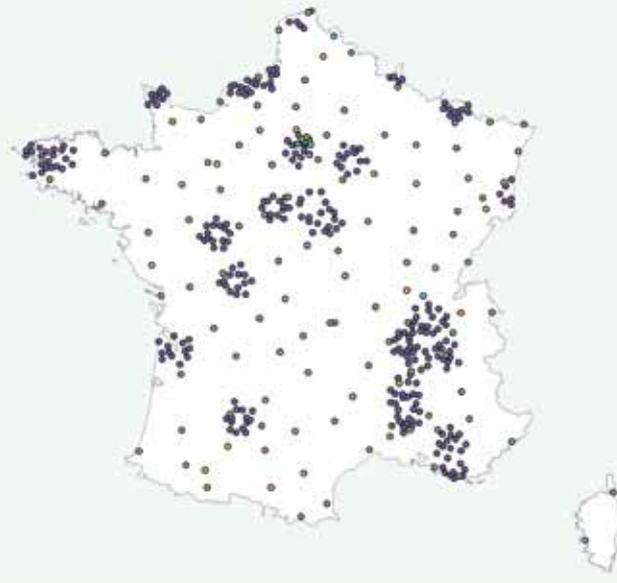


L'équipe en charge des réseaux d'alerte de l'IRSN avec les futures sondes Téléray.

a également fait l'objet d'une étude dont les conclusions orientent vers un réseau TCP/IP privatif en ADSL ou 3G. Cette modalité de transmission sera mise en œuvre à partir de 2011 avec le déploiement progressif de la nouvelle génération de sondes.

Enfin, la recherche de sites d'hébergement des sondes a été initiée, notamment aux abords des sites nucléaires.

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), la direction de la sécurité civile et les préfetures qui constituent un relai local essentiel, sont associées dans cette recherche d'hébergeurs et à la participation aux phases d'information et de communication auprès des parties prenantes locales.



À gauche : répartition actuelle des sondes Téléray. À droite : répartition planifiée des sondes Téléray en 2015.

LES RÉSEAUX DE PRÉLEVEMENTS

Les réseaux de surveillance par prélèvements de l'IRSN (Figure 1.6) couvrent l'ensemble du territoire français et sont constitués de quelques centaines de points d'échantillonnages. Les échantillons prélevés sont ensuite analysés dans les laboratoires de l'Institut accrédités selon la norme ISO 17025 par le COFRAC.

Ces prélèvements concernent les différents compartiments de l'environnement dans lesquels un marquage est susceptible d'être observé :

– le compartiment atmosphérique (stations de prélèvements

d'aérosols atmosphériques et de collecte d'eaux de pluies, réseau de dosimètres intégrateurs environnementaux (réseau « DTL ») pour la mesure du rayonnement gamma ambiant ;

– le compartiment terrestre (sols, végétaux, produits de la chaîne alimentaire) ;

– le compartiment aquatique continental (prélèvements d'eaux de surface continentales, matières en suspension (MES) décantées, sédiments, flore ou faune aquatiques) ;

– le compartiment marin (prélèvements d'eaux de surface marines, sédiments, flore et faune).



FIGURE 1.6

Les étapes de la surveillance par prélèvement et analyse en laboratoire.

En 2009, près de 23 000 prélèvements de 20 types différents ont été effectués sur l'ensemble du territoire français (Figure I.7). Ils ont donné lieu à plus de 27 000 analyses.

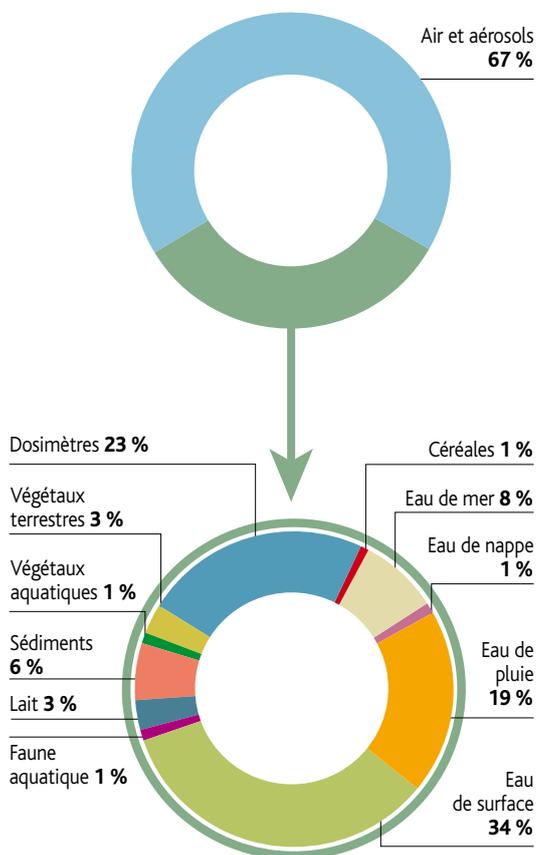


FIGURE I.7 Répartition par matrice des prélèvements réalisés en 2009.

MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE POUR LE CHOIX DES STATIONS DE SURVEILLANCE

Les principes généraux d'échantillonnage appliqués *in situ* sont similaires à ceux utilisés pour la caractérisation de toute contamination. Ils s'appuient sur les guides et normes établis notamment dans le cadre du Bureau de normalisation des équipements nucléaires (BNEN – AFNOR). Le recours à des bio-indicateurs de contamination qui facilitent l'identification et la quantification du marquage concerné est nécessaire.

Quelques repères normatifs pour le prélèvement destiné à la mesure radiologique sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

| Matrice | Norme | Intitulé |
|-------------------------|----------------------------------|--|
| Air | NF M60-760 (octobre 2001) | Énergie nucléaire – Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Air Prélèvement d'aérosols en vue de la mesure de la radioactivité dans l'environnement. |
| Eau | NF EN ISO 5667-1 (novembre 2005) | Qualité de l'eau Échantillonnage Partie 1 : guide général pour l'établissement des programmes d'échantillonnage et sur les techniques d'échantillonnage |
| Sol | NF ISO 18589-1 (décembre 2005) | Énergie nucléaire Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Sol Partie 1 : lignes directrices générales et définition |
| Indicateurs biologiques | NF M60-780-2 (mars 2001) | Énergie nucléaire Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Bio-indicateurs Partie 2 : guide général sur les techniques d'échantillonnage |
| Aliments | NF V03-009-1 (juillet 2002) | Produits alimentaires Mesure de la radioactivité dans les denrées alimentaires Partie 1 : guide pour l'échantillonnage, le transport et la conservation des denrées alimentaires Obtention d'un échantillon pour laboratoire |

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

Principes de localisation des stations de prélèvements

Compartiments terrestre et atmosphérique

Des stations de prélèvement sont réparties sur l'ensemble du territoire, en tenant compte en particulier de la localisation des installations nucléaires.

Ainsi, autour des installations nucléaires, les stations de prélèvement d'aérosols atmosphériques et les collecteurs d'eau de pluie sont systématiquement disposés sur des secteurs sous l'influence des vents dominants. Dans la mesure du possible, les prélèvements d'indicateurs biologiques et de denrées pouvant être produites sur l'ensemble du territoire (lait, salades, céréales...) sont également effectués dans des exploitations agricoles implantées à proximité de l'installation, sous les vents dominants.

Compartiment aquatique continental

Les échantillons d'eau et de flore sont prélevés à la fois en amont et en aval hydraulique des rejets d'effluents liquides du 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 pollution 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, en plus des marées, des courants résiduels entraînant 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 de ce courant ligure.

CHOIX DES MATRICES ENVIRONNEMENTALES

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

Compartiments atmosphérique et terrestre

TABLEAU I.2 Stratégie de surveillance des matrices surveillées dans le compartiment terrestre.

| Milieux/Produits | Justification | Moyens de prélèvements 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 irradiation externe et interne (inhalation). | Sonde Téléry Collecteur d'aérosols Dosimètre environnemental |
| 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. | Collecteur d'eau de pluie |
| Sols | Accumulation 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. | Prélèvement manuel |
| Productions végétales | Contamination par dépôt sur les parties aériennes ou par absorption racinaire. Certaines entrent dans la ration alimentaire. | Prélèvement manuel |
| 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...). | Prélèvement manuel |

Compartiment aquatique continental

TABLEAU I.3 Stratégie de surveillance des matrices surveillées dans le compartiment aquatique continental.

| Milieux/Produits | Justification | Moyens de prélèvements 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. | Sonde Hydrotéléray Hydrocollecteur 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. | Bac de décantation associé à un hydrocollecteur ou filtration |
| Sédiments | Les sédiments sont de bons intégrateurs de contamination, et constituent un réservoir de contamination du milieu aquatique par des phénomènes de désorption. | Prélèvement manuel |
| Végétaux aquatiques | Les végétaux aquatiques ont une grande capacité à fixer rapidement certains radionucléides. Leur large répartition géographique permet de comparer les concentrations en radionucléides en différents lieux. | Prélèvement manuel |
| Poissons | Régulièrement consommés par l'homme, les poissons sont de bons intégrateurs des radionucléides. | Pêche |

Compartiment marin

TABLEAU I.4 Stratégie de surveillance des matrices surveillées dans le compartiment marin.

| Milieux/Produits | Justification | Moyens de prélèvements ou de mesure directe |
|-----------------------|---|---|
| Eaux 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. | Prélèvement manuel ou hydrocollecteur |
| Sédiments | Les sédiments sont de bons intégrateurs de radionucléides et constituent un réservoir de contamination du milieu aquatique par des phénomènes de désorption. | Prélèvement manuel |
| Algues | Les algues marines réagissent rapidement à des variations de la radioactivité de l'eau. | Prélèvement manuel |
| Mollusques | De par leur mode de nutrition, les mollusques marins sont de bons bio-indicateurs de surveillance à long terme, qu'ils soient filtreurs ou brouteurs. | Prélèvement manuel (ou collecte chez des producteurs) |
| Crustacés Poissons | Leur position en fin de chaîne alimentaire en fait de bons intégrateurs des radionucléides, et ils sont largement consommés par les populations. | Pêche |

PLANS D'ANALYSES

Dès réception au laboratoire, les caractéristiques des prélèvements sont enregistrées dans une base de données informatique. Chaque prélèvement est ensuite traité et conditionné en fonction des analyses radiologiques auxquelles il va être soumis.

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

– voir paragraphe milieux récepteurs...) et de son historique événementiel (incidents passés, rejets passés, retombées...). Le Tableau I.5 présente, selon une représentation simplifiée, les plans d'analyses tels qu'ils sont réalisés régulièrement dans l'environnement des différents types de site.

Les résultats d'analyse sont ensuite intégrés dans la base de données afin d'y être validés, exploités puis diffusés.

TABLEAU I.5 Plans d'analyses types réalisés régulièrement dans le cadre de la surveillance radiologique du territoire.

| Environnement étudié | Radionucléides recherchés | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------|--------|----------------|-----------------|------------------|-------------------|-------|----------------|
| | U | Am, Pu | ³ H | ¹⁴ C | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs | Iodes | Autres β/γ (*) |
| Environnement hors influence | X | X | X | | X | X | | X |
| Ancien site minier | X | | | | | | | X |
| Amont du cycle du combustible | X | | | | | | | X |
| CNPE arrêté | Alpha global | | X | | X | X | X | X |
| CNPE en activité | | | X | X | X | X | X | X |
| Aval du cycle du combustible | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Site de stockage | X | X | X | | X | X | X | X |
| Service de médecine nucléaire | | | | | | | X | X |
| Centre de recherches | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Base navale | | | X | | | X | | X |

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

X Radionucléide recherché parfois

PRÉPARATION ET CONDITIONNEMENT DES ÉCHANTILLONS

La mesure de la radioactivité sur un échantillon débute par sa préparation physique. Celle-ci va du simple conditionnement en récipient de géométrie normalisée à une préparation plus élaborée comme le séchage, la calcination ou la lyophilisation qui permettent de concentrer

l'échantillon. Dans la plupart des cas, l'analyse ne nécessite pas d'utiliser l'intégralité de l'échantillon. Celui-ci est alors homogénéisé préalablement afin que la prise pour essai n'induisse pas de biais sur la représentativité de la mesure.

Les différents types de préparation des échantillons sont présentés dans le Tableau I.6.

TABLEAU I.6 Synthèse des types de préparation appliqués aux échantillons.

| Milieux/Produits | Types de préparation | États du produit | Types de mesures réalisées |
|--|--|--|--|
| Air | - | Filtre Cartouche de piège à iode | Spectrométrie gamma Comptages globaux α, β |
| Eaux de pluie Eaux de mer Eaux de surface Eaux souterraines | Homogénéisation Mélange Filtration Évaporation | Eau brute Eau filtrée Matières en suspension | Spectrométrie gamma Spectrométrie alpha Comptages globaux α, β Strontium 90 Tritium |
| Sols MES Sédiments | Séchage Broyage Homogénéisation Calcination | Produit frais Produit sec Cendres | Spectrométrie gamma Spectrométrie alpha Comptages globaux α, β Strontium 90 Carbone 14, carbone élémentaire |
| Productions végétales Céréales Algues | Séchage Broyage Homogénéisation Calcination Lyophilisation | Produit frais Produit sec Produit lyophilisé Phase liquide Cendres | Spectrométrie gamma Spectrométrie alpha Tritium libre Strontium 90 Comptages globaux α, β Carbone 14, carbone élémentaire |
| Lait | Homogénéisation | | |
| Poissons Crustacés Mollusques | Séparation de la chair Séchage Broyage Homogénéisation Lyophilisation Calcination | | |

L'IRSN assure également l'archivage d'une partie des échantillons analysés (filtres d'air), en vue par exemple d'une éventuelle analyse ultérieure par des moyens complémentaires ou plus performants.

RADIOCHIMIE ET MESURES PHYSIQUES

La nécessité de concentrer l'échantillon ou d'extraire les radionucléides à mesurer implique la mise en œuvre d'une plate-forme technique, qui permet de réaliser au meilleur niveau de qualité tout ou partie des étapes conduisant à la caractérisation des radionucléides présents dans un échantillon.

Après la préparation préliminaire (séchage, broyage, calcination...) présentée précédemment, les laboratoires de radiochimie réalisent des traitements poussés aboutissant généralement à la concentration ou à la séparation des radionucléides recherchés. Ces laboratoires disposent de moyens de traitement et d'analyses physico-chimiques des échantillons.

À l'issue de cette phase, les échantillons sont mis sous forme de sources et transmis au laboratoire de mesure nucléaire. Un parc de plus de 200 compteurs ou spectromètres (compteurs proportionnels alpha-bêta, compteurs alpha à photomultiplicateurs, compteurs à scintillation liquide, détecteurs gamma de type germanium avec passeurs d'échantillons, détecteurs gamma de type NaI, chambres à grille avec passeur et semi-conducteurs) permet la détection des rayonnements alpha, bêta ou gamma.

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.

La compétence des laboratoires de l'IRSN est démontrée par les bons résultats obtenus aux essais inter-laboratoires internationaux et reconnue par l'accréditation COFRAC ainsi que la participation active aux groupes de travail liés à la normalisation des méthodes.

Le référentiel d'accréditation suivi est la norme NF EN ISO/CEI 17025. Les domaines couverts par les accréditations sont :

- l'« analyse en laboratoire des radionucléides présents dans tous types d'échantillons de l'environnement » (programme n°135 du COFRAC) ;
- l'« analyse de contaminants chimiques chez les animaux, dans leurs produits et les denrées alimentaires destinées à l'homme ou aux animaux : radionucléides » (programme n° 99-4 du COFRAC).

La palette des compétences métrologiques mises en œuvre pour la mesure de la radioactivité dans l'environnement peut se résumer comme suit :

- mesures alpha-bêta global pour le suivi des filtres d'aérosols et des eaux ;
- mesure du ^{226}Ra ;
- 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 ...);
- mesure des émetteurs alpha tels que plutonium, ^{241}Am et ^{244}Cm , uranium, thorium et ^{210}Po ;
- mesure des éléments stables tels que K, Na, Ca, Fe, Sr, Ni, Pb.



FIGURES I.8

Salles de comptage alpha-bêta global (à gauche) et de spectrométrie alpha (à droite) de l'IRSN.



FIGURES I.9

Salles de spectrométrie gamma (à gauche) et de scintillation liquide (à droite) de l'IRSN.

L'ANALYSE DU TRITIUM DANS LES ÉCHANTILLONS DE L'ENVIRONNEMENT¹

Outre l'hydrogène tritié (HT), gaz présent dans l'air, le tritium existe principalement sous forme d'eau tritiée (HTO) dit « tritium libre » (forme la plus abondante du tritium dans le milieu naturel et les espèces vivantes) et tritium organique dit « tritium lié à la matière organique » (OBT pour « Organic Bounded Tritium »), incorporé dans la matière organique végétale ou animale.

L'analyse du tritium dans les échantillons de l'environnement peut être réalisée soit par la mesure de l'émission β du ^3H par **scintillation liquide** soit par comptage par **spectrométrie de masse** des atomes d' ^3He issus de sa désintégration.

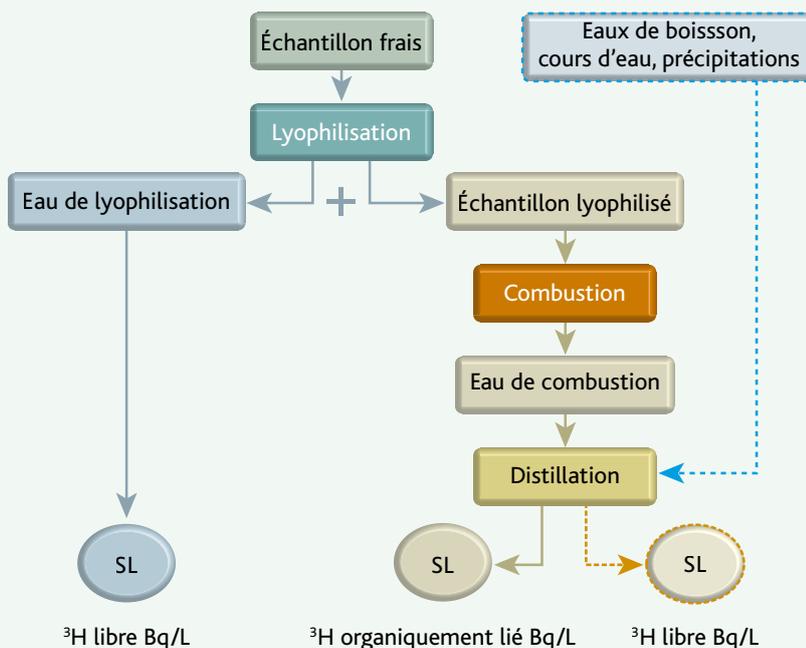
Les échantillons d'eau sont mesurés directement ou après distillation. Les autres échantillons subissent une transformation (barbotage pour les gaz, lyophilisation, combustion, distillation pour les matrices biologiques et les sols) qui permet d'extraire le tritium qu'ils contiennent sous la forme d'eau. Les résultats d'analyses sont exprimés en Bq/L d'eau naturelle, d'eau de distillation, de lyophilisation ou de combustion. Pour les calculs de dose, ils sont souvent convertis en Bq/kg frais en ce qui concerne les denrées consommables par l'homme. Pour des compteurs de **scintillation liquide**, standards ou très bas bruit de fond, les limites de détection se situent vers 5 Bq/L pour les premiers et 1 Bq/L pour les seconds.

¹ – Référence : « Le tritium dans l'environnement » – rapports IRSN DEI 2009-05 et IRSN DEI 2010-01.



Compteur à scintillation liquide et flacons dédiés aux échantillons.

La mesure par **spectrométrie de masse** de l'isotope ^3He issu de la désintégration du tritium est une méthode de choix pour analyser le tritium dans un grand nombre d'échantillons avec une sensibilité très grande (dans la mesure où un délai d'attente de plusieurs mois n'est pas rédhibitoire). L'échantillon est dégazé puis stocké pour la croissance de ^3He pendant une durée dépendant de la limite de détection à atteindre. La teneur de ce gaz rare est ensuite comptée par spectrométrie de masse. Des limites de détection de l'ordre de 0,01 à 0,1 Bq/L peuvent être obtenues.



Principe d'analyse d'échantillons contenant du tritium.

L'ANALYSE DU CARBONE ¹⁴C DANS LES ÉCHANTILLONS DE L'ENVIRONNEMENT

Le carbone possède deux isotopes stables qui constituent la quasi totalité de la masse du carbone terrestre : le carbone 12 (98,9 %) et le carbone 13 (1,1 %).

Le ¹⁴C, isotope radioactif, n'est présent qu'à l'état de traces dans la biosphère et représente une fraction infime du carbone total. Dans l'environnement, le ¹⁴C peut se trouver sous forme de carbone minéral (dioxyde de carbone CO₂, méthane CH₄, carbonates...) ou de matières organiques. Il est d'usage de mesurer l'activité spécifique qui est le rapport isotopique ¹⁴C / C, exprimé en becquerels de ¹⁴C par kilogramme de carbone total.

La quantification du carbone 14 dans les échantillons de l'environnement peut être réalisée soit par mesure d'activité soit par comptage d'atomes. Le choix de la méthode dépend de la nature de l'échantillon et notamment de sa teneur en carbone. Ces méthodes diffèrent également par les prises d'essais qu'elles permettent de traiter, le délai de ce traitement et par leurs performances en termes d'incertitude de mesure. Les méthodes mises en œuvre consistent à transformer le carbone contenu dans la prise d'essai en CO₂ à partir duquel une source mesurable est préparée.

Les méthodes les plus utilisées sont les suivantes.

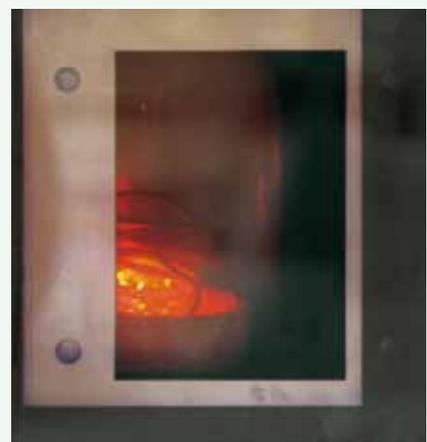
Analyse par oxydiser

Le CO₂ issu de la combustion de l'échantillon est piégé par absorption dans une colonne contenant du Carbosorb® pour donner un carbamate extrait de la colonne par élution au moyen de liquide scintillant directement recueilli dans un flacon pour la mesure. L'expression de l'activité de l'échantillon en Bq de ¹⁴C par kg de carbone, nécessite par ailleurs une mesure de la teneur en carbone élémentaire de l'échantillon, généralement réalisée par chromatographie en phase gazeuse. L'incertitude sur la mesure, de l'ordre de 30 à 40 % (k=2) est du même ordre de grandeur que le bruit de fond de l'environnement. Elle ne permet pas de mettre



Oxydiser.

aisément en évidence des marquages faibles. Il est cependant possible d'augmenter les prises d'essai, en pastillant par exemple. Il est également envisageable de brûler successivement plusieurs prises d'essai du même échantillon (trois fois par exemple) dont les spectres sont cumulés et d'aboutir à des incertitudes de l'ordre de 10 %.



Combustion oxydante.

L'ANALYSE DU CARBONE 14 DANS LES ÉCHANTILLONS DE L'ENVIRONNEMENT

Ligne de synthèse organique du laboratoire de mesure de la radioactivité dans l'environnement.



Le spectromètre de masse par accélérateur (AMS) au laboratoire de mesure du carbone 14 du CEA.



Analyse par synthèse de benzène

L'échantillon est soumis à une combustion en présence d'oxygène (9 bars) dans une « bombe de PARR ». Le CO_2 formé est transformé en benzène dans une ligne de synthèse organique. Le flacon de comptage est préparé en ajoutant par pesée le benzène synthétisé, les scintillants et, si besoin, du benzène pour compléter le volume. L'activité en ^{14}C est ensuite mesurée par scintillation liquide. Le résultat est directement convertible en Bq/kg de carbone. Ces méthodes sont adaptées pour les échantillons contenant une forte teneur en carbone.

Mesure par accélérateur (AMS)

La mesure du ^{14}C par spectrométrie de masse par accélérateur (AMS) est privilégiée pour les échantillons disponibles en faibles quantités ou contenant un faible taux de matières organiques (sols, sédiments, eaux de mer, échantillons d'air...). Après décarbonatation et combustion de l'échantillon, le CO_2 obtenu est réduit par H_2 en présence de poudre de fer. Le mélange carbone + poudre de fer est ensuite pressé dans une cible afin d'être mesuré. L'activité de l'échantillon est calculée en comparant les intensités des

faisceaux de ^{14}C , ^{13}C et ^{12}C de chaque échantillon, mesurées séquentiellement, avec ceux de standards de CO_2 .

TABLEAU 1.7 Tableau récapitulatif des méthodes.

| | Oxydiser | Synthèse de benzène | AMS |
|---|---|---------------------|---------|
| Prise d'essai (g sec) | 0,5 | 7 à 10 | 0,1 |
| Incertitude de mesure (k = 2) en Bq/kg de C | 30 à 40 % (10 % en appliquant des protocoles particuliers) | 6 à 7 % | 2 à 3 % |
| Temps minimum nécessaire à l'analyse de routine * | 2 jours | 5 jours | 2 jours |

* Le temps indiqué est le « temps technique » nécessaire à l'analyse (traitement de l'échantillon sec et mesure). Il ne prend pas en compte les contraintes d'organisation qui font, par exemple, que des instrumentations lourdes, de type AMS, ne peuvent généralement être sollicitées que pour un lot d'échantillons, par campagnes et à dates fixes.



II

LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE ET ARTIFICIELLE EN FRANCE

II.1 La radioactivité naturelle

II.2 La radioactivité artificielle



La radioactivité actuelle de l'environnement résulte de radionucléides naturels, présents sur la Terre depuis son origine, et de radionucléides artificiels, introduits par l'homme à partir du milieu du XX^e siècle ; certains de ces radionucléides ayant la double origine, naturelle et anthropique (tritium, carbone 14) (voir *Tableau II.1*).

■ II.1 LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE

La radioactivité fait partie de l'univers. Sans aucune intervention humaine, elle est présente partout. 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. L'interaction des rayons cosmiques avec le champ magnétique terrestre forme la magnétosphère qui, avec l'atmosphère, forme 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 (il double tous les 1 500 m) (voir *Figure II.1, page suivante*).

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 du caractère chimique 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.

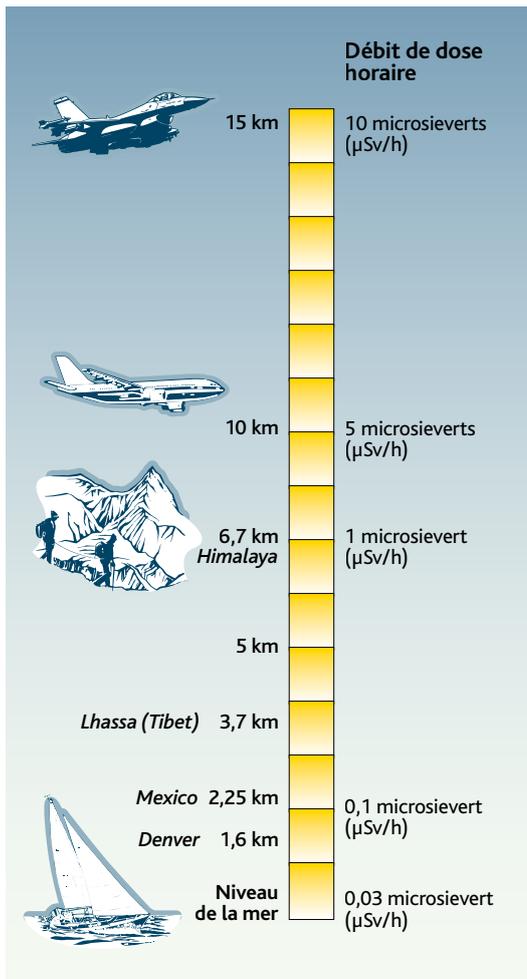


FIGURE II.1 La dose due aux rayonnements cosmiques croît avec l'altitude.

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 radioactifs¹. 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.

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 concentre par confinement la diffusion du gaz radon. Ce gaz, ainsi que les produits qui en dérivent, se fixe dans les voies respiratoires.

¹ – Source : La radioactivité naturelle en 10 épisodes, Livret de la SFRP, 1998

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, rubidium 87 et cérium 142), 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 (²³⁸U, ²³⁵U et ²³²Th) ont plusieurs descendants radioactifs, qui constituent des familles ou chaînes de désintégration comportant chacune entre dix et quinze radionucléides différents.

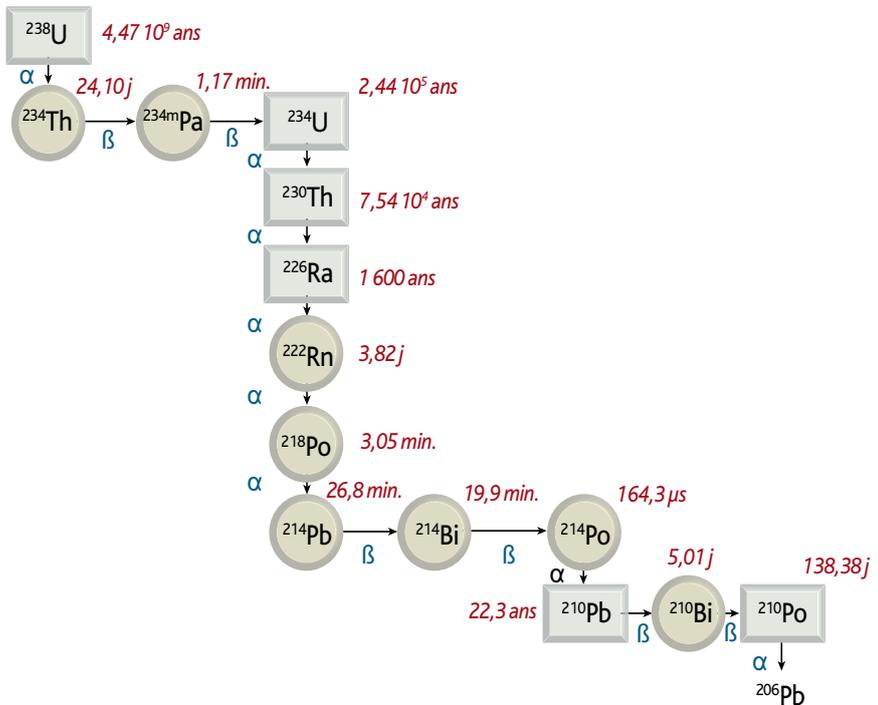


FIGURE II.2 Chaîne de filiation de l'uranium 238.

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).

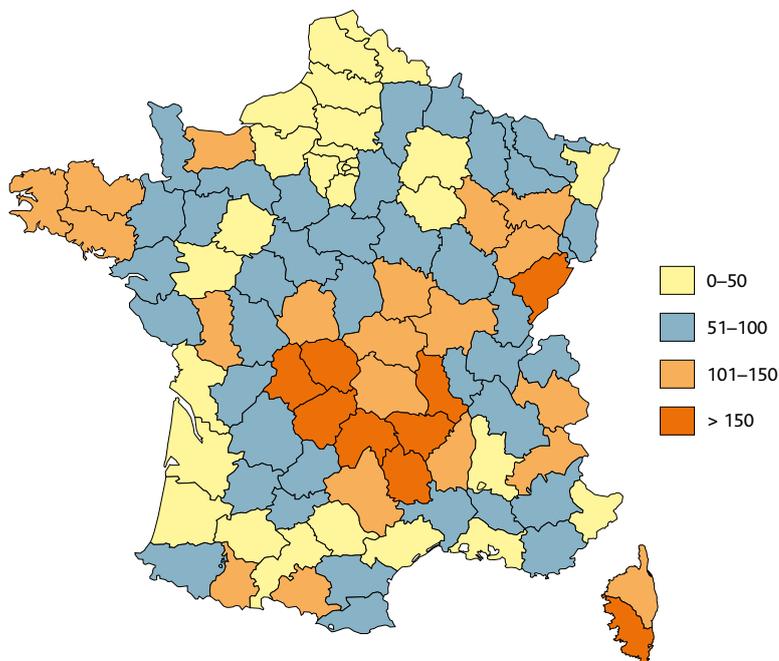


FIGURE II.3 Moyenne par département des concentrations en radon dans l'air des habitations (en Bq/m^3).

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 présent 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. 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 le 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.

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

- **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 ;
- **l'altitude** : les séjours en altitude se traduisent par des suppléments d'exposition.

2 – En outre, 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 d'eau souterraine par filtration destinée à la production d'eau de consommation ;
- les établissements thermaux.

3 – Enfin, 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 ci-dessus, le minerai est utilisé pour ses propriétés radioactives.

■ II.2 LA RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE

LES SOURCES DE RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE

Par opposition aux radionucléides naturels, les radionucléides « artificiels » désignent les éléments radioactifs qui n'existent plus sur la Terre, et qui sont recréés artificiellement. Depuis le début du XX^e siècle, les activités humaines ont entraîné la présence de radioactivité artificielle dans l'environnement.

La production volontaire 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 créés dans les réacteurs nucléaires. Certains de ces radionucléides, fortement radioactifs et

actuellement inutilisés par l'homme, constituent des déchets nucléaires devant être stockés sous haute surveillance.

Actuellement, une dizaine de radionucléides artificiels sont régulièrement mesurés dans l'environnement français au moyen des techniques d'analyses développées par l'IRSN, principalement : le tritium, le carbone 14, le strontium 90, le césium 137, l'iode 131, les isotopes du plutonium (²³⁸Pu, ²³⁹Pu, et ²⁴⁰Pu) ainsi que l'américium 241.

Ces radionucléides ont trois origines principales :

- les rejets réglementés des installations nucléaires et ceux liés aux activités de médecine nucléaire (examens radiologiques et traitements médicaux) ;
- 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.

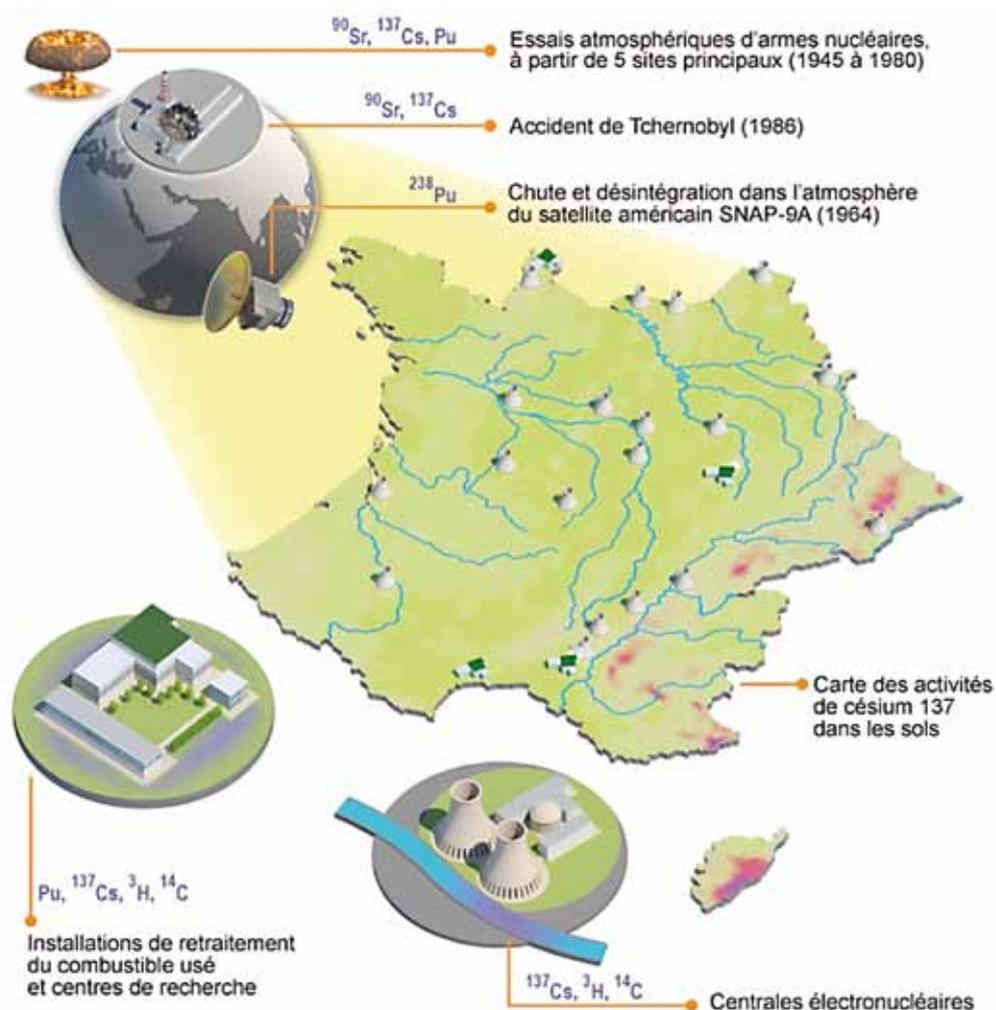
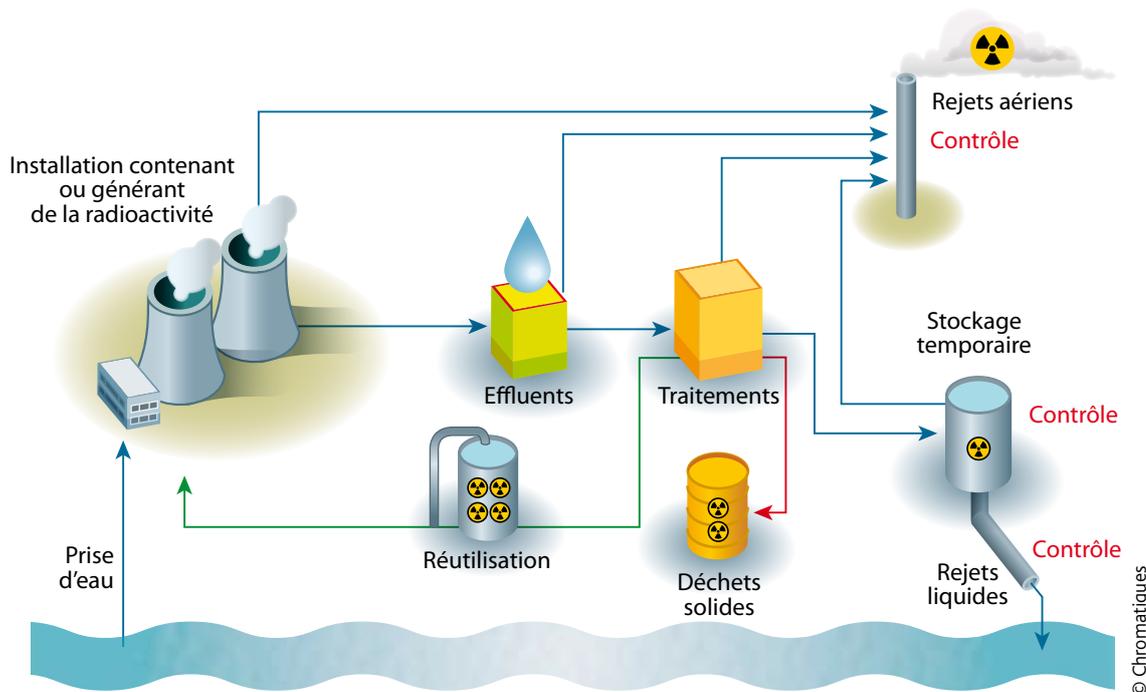


FIGURE II.4 Les principales sources de radioactivité artificielle dans l'environnement français.



© Chromatiques

FIGURE II.5 Origine et typologie simplifiées des effluents d'une installation nucléaire.

Les rejets des installations industrielles et de recherche sur l'énergie nucléaire, dont les centrales nucléaires de production d'électricité, sont réglementés. Pour fonctionner, les installations du cycle utilisent de l'eau prélevée soit dans les cours d'eau, soit dans la mer (Figure II.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 voie liquide et aérienne 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 différents 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 par trois radionucléides :

- le krypton 85, gaz rare, donc inerte chimiquement, de 10,7 ans de période, rejeté sous forme gazeuse lors du retraitement du combustible (usine AREVA NC de La Hague) ;
- le tritium ;
- le carbone 14.

Enfin, les rejets provenant des activités de médecine nucléaire sont caractérisés par des radio-isotopes de demi-vie très courte (8 jours pour l'iode 131 et 6 heures pour le technétium 99 métastable).

LES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS PRÉSENTS DANS L'ENVIRONNEMENT EN FRANCE

Le tritium et le carbone 14

Également produits naturellement dans l'atmosphère par interaction des rayonnements cosmiques et de la matière, et provenant des retombées des tirs, le tritium (^3H) et le carbone 14 (^{14}C) figurent parmi les radionucléides les plus rejetés par l'industrie nucléaire.

À l'échelle de la France, la répartition du carbone 14 et du tritium est assez homogène. L'hétérogénéité des retombées des essais nucléaires est sans doute masquée par la composante naturelle prédominante qui est, pour sa part, très homogène. En milieu terrestre, dans les territoires non influencés par les rejets des installations nucléaires, l'activité spécifique exprimée en becquerels de ^{14}C par kilogramme de carbone total est en équilibre avec les composants de l'environnement, et notamment avec le CO_2 atmosphérique. En 2009, cette activité spécifique est d'environ 237 ± 6 Bq/kg de carbone, et se rapproche de l'activité atmosphérique avant les essais nucléaires aériens (226 Bq/kg de carbone). En milieu aquatique, le ^{14}C des écosystèmes d'eau douce n'est pas en équilibre avec le CO_2 atmosphérique. Les activités y sont plus faibles, de l'ordre de 200 Bq/kg de carbone.

En ce qui concerne le tritium, à l'écart de toute source d'origine anthropique, les concentrations sont de l'ordre de un à quelques Bq/L d'eau douce ou par kg frais de denrées et de 0,01 à 0,05 Bq/m³ dans l'air.

Cependant, au voisinage de certaines installations nucléaires, sous les vents dominants ou en aval des émissaires de rejet, les activités en ^3H et ^{14}C sont quelquefois plus importantes.

Si la plupart des installations nucléaires marquent leur environnement en ^{14}C de manière légère mais visible, seuls les environs de quelques sites nucléaires français présentent des activités en ^3H qui sortent nettement du bruit de fond : Valduc, Marcoule, La Hague, Saclay, Bruyères-le-Châtel. Enfin, le ^3H a été rejeté par certaines industries qui l'utilisent pour sa luminescence dans les aiguilles de montres ou certains panneaux de signalisation. Par exemple, l'amont du Rhône est ainsi marqué en ^3H par les rejets de l'industrie horlogère suisse.

Le césium 137

Le césium 137 résulte des essais nucléaires, de l'accident de Tchernobyl et figure également dans les rejets de certaines installations nucléaires : centrales nucléaires, installations de retraitement du combustible usé et centres de recherche. Néanmoins, il n'est presque jamais possible de déceler la part des rejets de ces installations dans l'environnement terrestre car elle est très largement masquée par la rémanence des retombées anciennes.

Après avoir atteint un maximum de 4 000 Bq/m² en 1963, l'activité surfacique des sols en ^{137}Cs a ensuite lentement diminué après l'arrêt des essais atmosphériques d'armes nucléaires par les américains et les soviétiques, par décroissance radioactive ainsi que par des processus de dilution et de migration.

L'accident de Tchernobyl a conduit en mai 1986 à des dépôts supplémentaires de césium 137, hétérogènes sur le territoire.

Aujourd'hui, les concentrations de césium 137 dans les sols 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 atteindre 40 000 Bq/m².

Le césium 137 est également encore mesuré dans l'air en France, à un niveau moyen inférieur à 1 µBq/m³, et dans l'eau de pluie à un niveau de l'ordre de 0,01 à 0,1 mBq/L. Toutefois, cette activité a cessé de diminuer ces dernières années. Un équilibre semble s'être installé entre l'activité qui se dépose à la surface du sol et celle qui est remise en suspension à partir des stocks présents dans les sols et les végétaux. Dans les denrées, les niveaux vont de la limite de détection à plusieurs centaines de Bq/kg frais pour certains champignons.

Le strontium 90

Le strontium 90 provient presque exclusivement des retombées des tirs. La contamination surfacique des sols en ^{90}Sr a ainsi augmenté progressivement depuis 1945 pour atteindre un maximum de 2 500 Bq/m² en 1963. L'arrêt des essais nucléaires a ensuite entraîné une lente diminution par décroissance radioactive, qui se poursuit jusqu'à aujourd'hui. Le strontium 90 reste encore détectable dans les sols, le lait et des échantillons de végétaux. Les niveaux observés dans les denrées sont, en général, de l'ordre de 0,1 Bq/kg frais.

Les transuraniens (plutonium, américium)

Les isotopes du plutonium (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu et ^{241}Pu) sont issus presque exclusivement des retombées des essais nucléaires atmosphériques et, pour le ^{238}Pu , de la chute du satellite américain SNAP-9A en 1964 dont l'énergie était produite au moyen d'une pile alimentée au ^{238}Pu . Dans les denrées, les activités du ^{239}Pu peuvent atteindre quelques mBq/kg frais, mais restent souvent inférieures à la limite de détection.

Les rejets atmosphériques et liquides passés de plutonium par certaines installations, comme Marcoule ou La Hague, ont conduit à des marquages en ^{238}Pu , ^{239}Pu et ^{240}Pu de leur environnement immédiat par rapport au bruit de fond des retombées anciennes.

L'américium 241 n'était pas présent dans les retombées mais provient de la désintégration du ^{241}Pu . Aussi, son activité augmente régulièrement et atteindra son maximum en 2036, lorsqu'il n'y aura plus assez de ^{241}Pu pour que la production de ^{241}Am puisse compenser sa lente décroissance radioactive (de 433 ans de période).

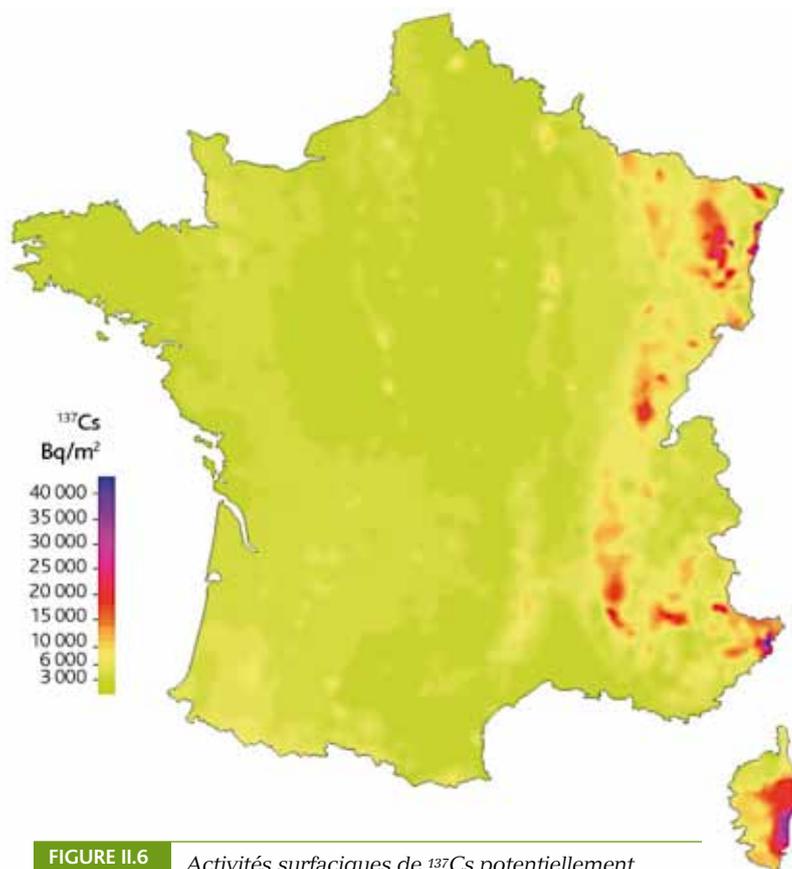


FIGURE II.6 Activités surfaciques de ^{137}Cs potentiellement présentes dans les sols français en 2007.

Les autres radionucléides artificiels

D'autres radionucléides artificiels sont mesurés de manière plus ponctuelle dans les milieux aquatiques continentaux et marins :

- sous influence des rejets des installations nucléaires, le manganèse 54 (^{54}Mn), les cobalts 58 et 60 (^{58}Co et ^{60}Co), l'argent 110 métastable ($^{110\text{m}}\text{Ag}$), l'iode 129 (^{129}I) et très sporadiquement le ruthénium 106 (^{106}Ru) et le césium 134 (^{134}Cs) ;
- sous influence des rejets hospitaliers, l'iode 131 (^{131}I) dans des MES ou végétaux aquatiques.

La détection de ces radionucléides est extrêmement rare dans le milieu terrestre si ce n'est à des niveaux proches des limites de détection.

Enfin, l'Institut a engagé, dans l'environnement proche de La Hague, un suivi des concentrations en krypton 85 (^{85}Kr) dans l'air, radionucléide gazeux, dont un premier bilan a été réalisé en 2010.

TABLEAU II.1 Principaux radionucléides artificiels présents dans l'environnement français.

| Radionucléide | Période radioactive | Émissions principales | Principal descendant | Origines principales |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---|
| ^3H | 12,32 ans | Bêta | ^3He | Cosmique, essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire et horlogère |
| ^{14}C | 5 730 ans | Bêta | ^{14}N | Cosmique, essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire et de la recherche |
| ^{60}Co | 5,27 ans | Bêta, gamma | ^{60}Ni | Rejets de l'industrie nucléaire |
| ^{90}Sr | 28,78 ans | Bêta | ^{90}Y | Essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire |
| ^{131}I | 8 jours | Bêta, gamma | ^{131}Xe | Rejets de l'industrie nucléaire et des services de médecine nucléaire |
| ^{137}Cs | 30,07 ans | Bêta, gamma | ^{137}Ba | Essais nucléaires, accident de Tchernobyl, rejets de l'industrie nucléaire |
| ^{238}Pu | 87,7 ans | Alpha | ^{234}U | Essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire |
| $^{239+240}\text{Pu}$ | 24 100 et 6 560 ans | Alpha | $^{235+236}\text{U}$ | Essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire |



III

LES RÉSULTATS DE LA SURVEILLANCE GÉNÉRALE DU TERRITOIRE

III.1 Le compartiment atmosphérique

III.2 Le milieu continental

III.3 Le littoral

III.4 La surveillance radiologique outre-mer

III.5 Les constats radiologiques régionaux



III.1 LE COMPARTIMENT ATMOSPHÉRIQUE

LE RÉSEAU TÉLÉRAY

Depuis 1991, le réseau Téléray assure de façon permanente la veille radiologique du territoire français. Les 163 stations métropolitaines (plus six installées en outre-mer) sont implantées majoritairement aux abords des sites nucléaires et des grandes agglomérations (Figure III.1). Les sondes (Figure III.2) sont constituées de compteurs Geiger-Müller permettant de mesurer le rayonnement gamma ambiant, exprimé en débit de dose équivalente (nSv/h). Toutes les mesures, intégrées sur cinq minutes, sont transférées automatiquement vers un serveur situé sur le site IRSN du Vésinet (78).



FIGURE III.1 Localisation des sondes Téléray en 2009.

■ Taux de disponibilité du réseau Téléray : 98 %



FIGURE III.2 Photo d'une sonde Téléray (détecteur Geiger-Müller).

En situation normale, le serveur, auquel est adjoit un système d'analyse de premier niveau des données (système de supervision), recueille en permanence les mesures auprès de chacune des sondes. Si le débit de dose augmente sensiblement, les sondes concernées envoient une alarme au système de supervision, qui alerte aussitôt le personnel d'astreinte de l'IRSN. La fréquence du rapatriement des données est alors augmentée.

L'IRSN a mis en place un indicateur relatif à la disponibilité des balises métropolitaines du réseau Téléray. Cet indice est calculé à partir du nombre de valeurs radiologiques moyennes quotidiennes enregistrées par le réseau. En 2009, le taux de disponibilité ainsi calculé s'établit à plus de 98 % en général et pour les stations implantées sur les centres nucléaires (Figure III.3).

Les valeurs de débit de dose gamma ambiant moyen en France enregistrées au cours de l'année 2009 sont du même ordre de grandeur que celles mesurées les années précédentes. La moyenne annuelle sur le territoire métropolitain est estimée à environ 90 nSv/h (Figure III.4).

Le bilan des mesures du réseau Téléray permet de mettre en évidence les évolutions moyennes quotidiennes acquises durant l'année et présentées en fonction des catégories d'implantation (Figure III.5). Les rayonnements telluriques et cosmiques constituent l'essentiel du débit de dose enregistré par les stations Téléray, notamment pour celles situées en altitude (rayonnements tellurique et cosmique plus élevés).

Les fluctuations importantes des mesures du débit de dose enregistrées sur les sommets sont engendrées par la présence occasionnelle de couverture neigeuse au sol qui diminue l'influence du rayonnement tellurique. L'homogénéité de la répartition géographique des sites d'implantation Téléray permet d'établir une moyenne annuelle du débit de dose par région (Figure III.6).

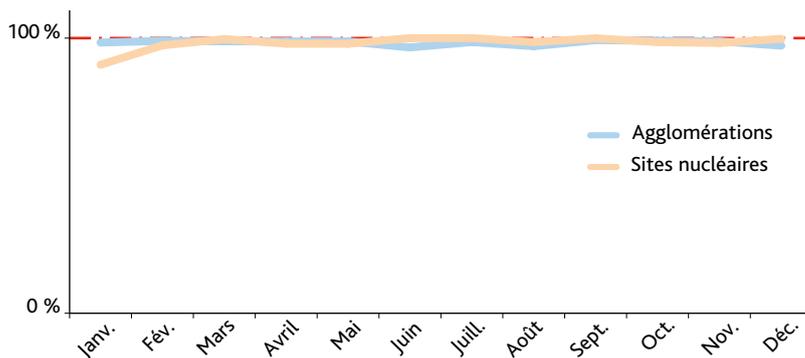


FIGURE III.3 Taux de disponibilité du réseau Téléray en métropole.

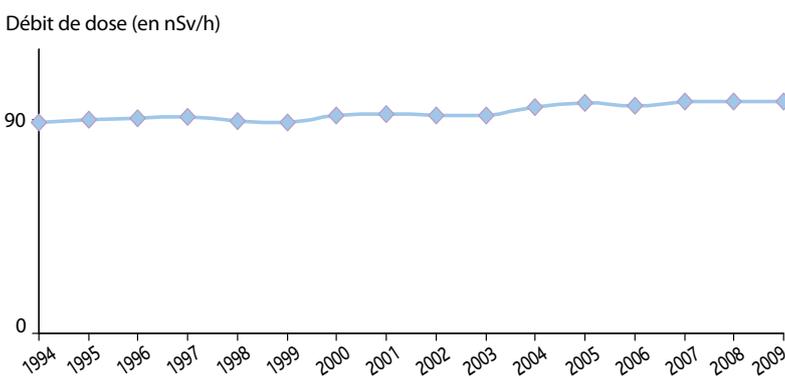


FIGURE III.4 Évolution de la moyenne annuelle des mesures du réseau Téléray de 1994 à 2009.

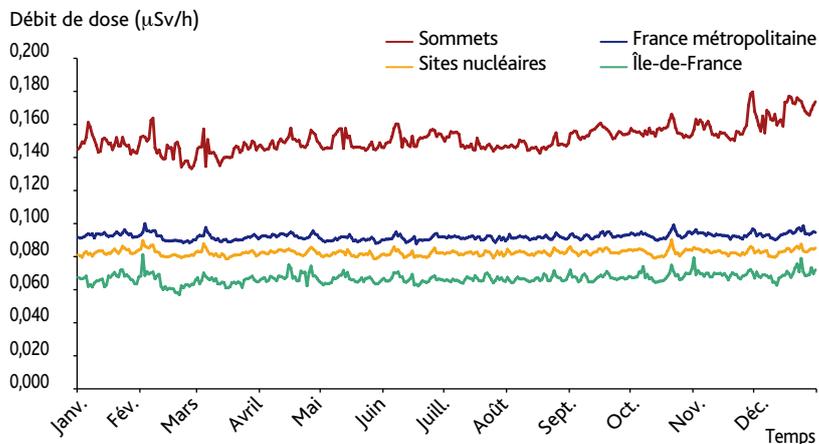


FIGURE III.5 Évolution du débit de dose par catégorie d'implantation en 2009.

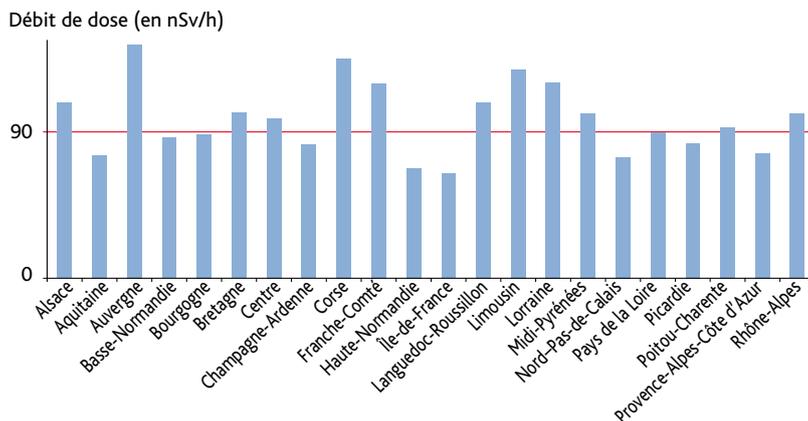


FIGURE III.6 Moyennes annuelles régionales du débit de dose en 2009.

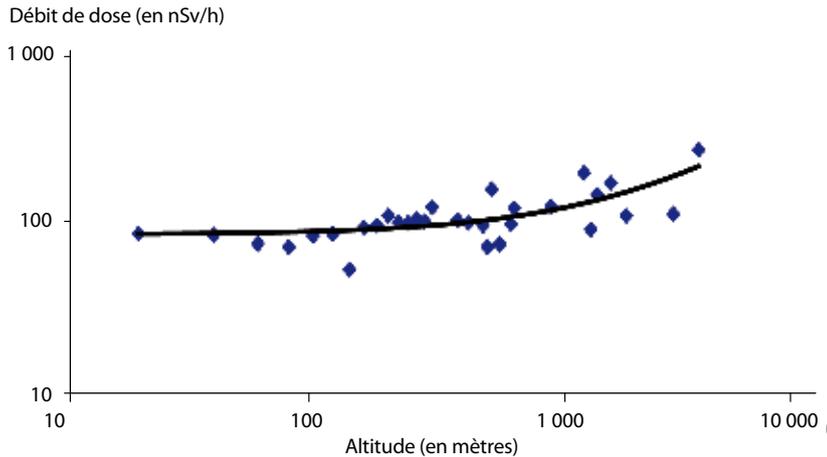


FIGURE III.7 Évolution de la moyenne annuelle du débit de dose en fonction de l'altitude des stations en 2009.

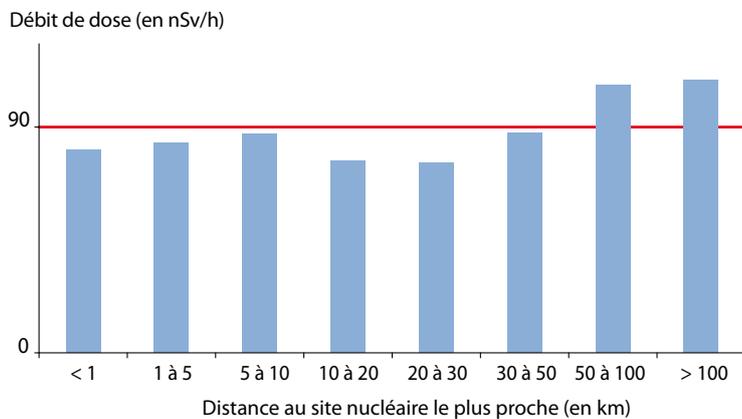


FIGURE III.8 Influence de la proximité des sites nucléaires sur le débit de dose.

Le bruit de fond ambiant est faible dans les bassins sédimentaires (bassins parisien et aquitain ou vallée du Rhône) et plus élevé sur les massifs composés de roches plutoniques (essentiellement granitiques) ou métamorphiques (Alpes, Massif central, etc.) où l'influence du rayonnement gamma d'origine tellurique est plus élevée. À ce phénomène se superpose l'influence du rayonnement cosmique, plus important en altitude qu'au niveau de la mer. Cette influence, modérée aux altitudes moyennes, devient prépondérante à partir de 3 000 mètres d'altitude comme l'illustre le graphique présenté ci-contre (Figure III.7).

Une analyse des mesures moyennes de débit de dose à proximité ou à distance des installations nucléaires, démontre assez bien qu'en fonctionnement normal, aucune influence de l'activité de ces installations ne peut être mise en évidence par le réseau Télecray (Figure III.8).

Les sites nucléaires étant situés près des sources d'eau douce ou d'eau de mer (les bassins sédimentaires fluviaux ou marins sont en effet caractérisés par un faible rayonnement tellurique), il est logique de constater que les mesures moyennes du débit d'équivalent de dose y sont plus faibles que la moyenne nationale.

En 2009, aucune mesure anormale relative à un événement radiologique accidentel n'a été détectée par le réseau Télecray. Quelques événements naturels d'origine météorologique ont occasionné des augmentations du débit de dose pouvant parfois conduire à des dépassements de seuils d'alarme.

LE RÉSEAU DE DOSIMÈTRES THERMOLUMINESCENTS (DTL)

Développé à partir de 1985, le réseau de dosimètres thermoluminescents (réseau DTL) permet d'effectuer la surveillance de la dose externe due au rayonnement gamma ambiant dans l'environnement, intégrée sur des périodes de six mois.

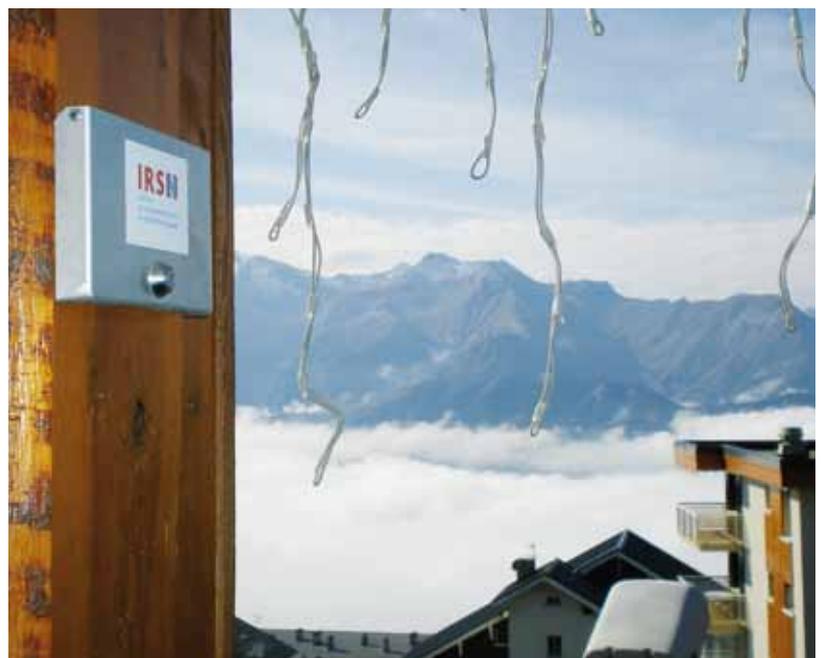


FIGURE III.9 Dispositif DTL dans les Alpes françaises.

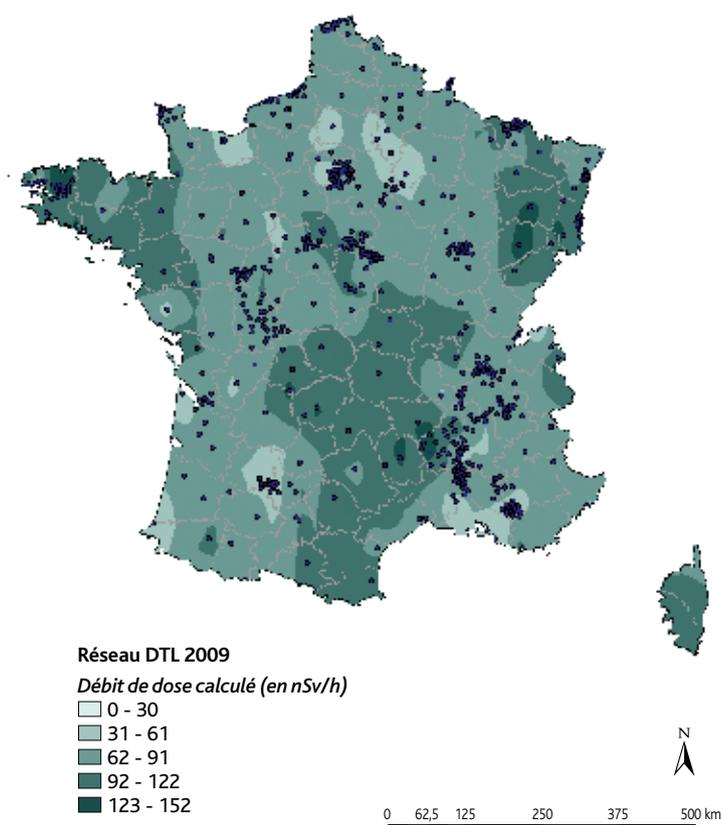


FIGURE III.10 Représentation cartographique des données (exprimées en débit de dose horaire) du réseau de DTL en France en 2009.

Environ 900 DTL sont déployés sur le territoire (métropole et DOM-TOM), avec une densité renforcée aux abords des sites nucléaires (Figure III.10). Le réseau met en œuvre un dispositif passif ne nécessitant pas d'apport d'énergie, peu coûteux, facile d'installation et sans maintenance.

Les DTL employés, tous identiques, permettent l'enregistrement de doses de 10 microSieverts à 1 000 Sieverts. Ils couvrent la gamme des débits de dose possibles dans un contexte environnemental, tout en étant d'une sensibilité suffisante pour mesurer de faibles variations en chaque lieu d'implantation.

L'interprétation cartographique simplifiée ci-contre représente la moyenne annuelle des mesures enregistrées par les dosimètres, avec cependant un biais lié à l'hétérogénéité des implantations.

Les résultats obtenus en 2009 sont du même ordre de grandeur que ceux des années précédentes. Ces résultats varient entre 0,3 mSv/an et 1,4 mSv/an. À l'instar de l'analyse des résultats de mesure du réseau Télecray, les doses annuelles varient en fonction de la nature des roches (influence des descendants du radon et du rayonnement tellurique) et de l'altitude (influence du rayonnement cosmique). Elles sont ainsi représentatives de la radioactivité naturelle du territoire français.



FIGURE III.11 Localisation des stations du réseau OPERA-Air de prélèvement des aérosols exploitées en 2009.

LE RÉSEAU OPERA-AIR : LES AÉROSOLS ATMOSPHÉRIQUES

La surveillance de la radioactivité dans les aérosols atmosphériques est assurée sur l'ensemble du territoire par deux types de stations complémentaires (Figure III.11) constituant le réseau OPERA-Air (Observatoire permanent de la radioactivité dans l'air) :

- des stations dites « AS » (Air au niveau du sol) qui permettent d'obtenir une information hebdomadaire de la radioactivité des aérosols ;
- des stations dites « TGD » (Très grand débit) qui permettent de quantifier le bruit de fond ambiant pour des radionucléides présents en très faible quantité dans l'air (par exemple le césium 137). Certaines de ces stations sont accompagnées d'un dispositif de prélèvement des eaux de pluie.



FIGURE III.12 Station AS du site IRSN du Vésinet (gauche) et prélèvement du filtre (droite).

Les stations AS en 2009

44 stations de prélèvements d'aérosols AS sont déployées sur le territoire, dont 31 sont implantées sous l'influence potentielle d'une installation nucléaire. Après un prélèvement de 24h à un débit moyen de l'ordre de 7 à 10 m³/h, les filtres sont relevés quotidiennement pour des analyses radiologiques en laboratoire (Figure III.12).

En 2009, les analyses de spectrométrie gamma montrent la présence constante du béryllium 7 et du plomb 210, radionucléides d'origine naturelle, créés respectivement sous l'effet du rayonnement solaire dans les hautes couches atmosphériques et de l'émanation du radon 222 du sol (le plomb 210 est l'un des descendants radioactifs à vie longue de ce gaz).

Béryllium 7

En fonction des variations climatiques saisonnières, le béryllium 7 est retrouvé en plus ou moins grande concentration dans les aérosols au niveau du sol (Figure III.13).

Activité (mBq/m³)

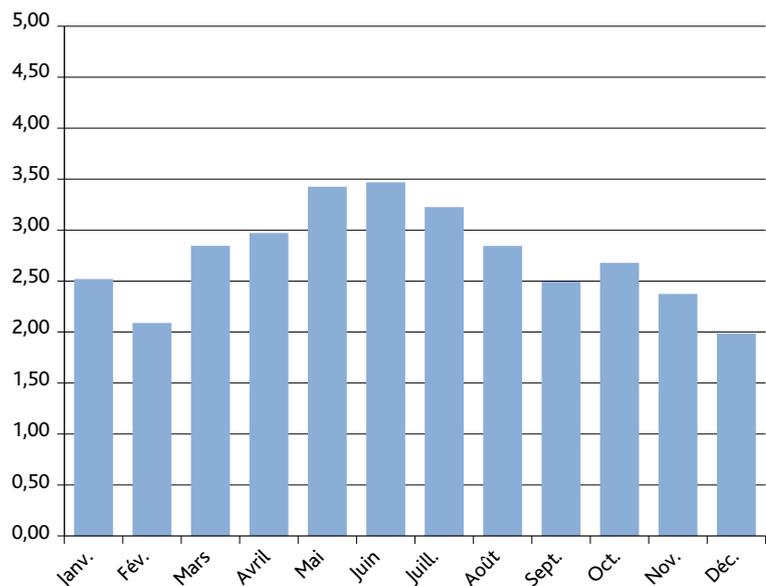


FIGURE III.13 Activités volumiques moyennes en ⁷Be mesurées en 2009 par les stations AS du réseau OPERA-Air.

Plomb 210

L'activité volumique mensuelle observée du plomb 210 varie en fonction des régions. Elle est présentée dans la figure ci-dessous (Figure III.14) pour l'année 2009.

Plomb 210 (en mBq/m³)

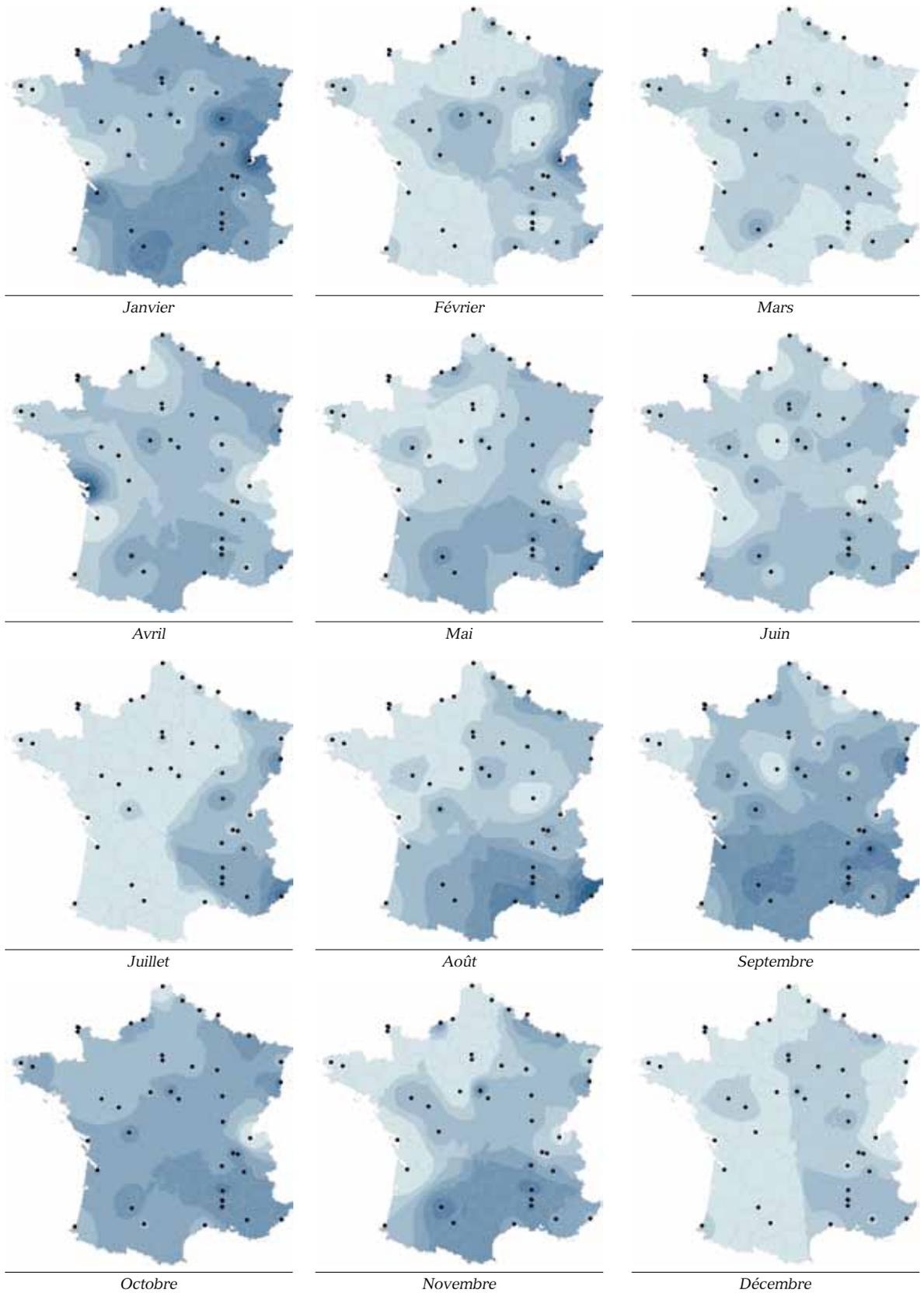


FIGURE III.14 Représentation cartographique des moyennes mensuelles de l'activité volumique du plomb 210 dans les aérosols sur l'ensemble du territoire en 2009.



FIGURE III.15 Stations de prélèvement TGD. Version à gauche : 300 m³/h ; version à droite : 700 m³/h.

Les stations TGD en 2009

Huit stations de collecte d'aérosols à très grand débit (300 à 700 m³/h) sont distribuées sur le territoire (Figure III. 15). La collecte s'effectue sur dix jours consécutifs de façon à accumuler une grande quantité d'aérosols. En complément, une métrologie de pointe permet de mesurer des traces de ¹³⁷Cs infinitésimales à des niveaux représentatifs (< 0,1 µBq/m³).

En effet, depuis l'accident de Tchernobyl en 1986, les niveaux de ¹³⁷Cs dans l'air n'ont cessé de diminuer (Figure III. 16) requérant d'améliorer les dispositifs de prélèvement et de mesure. Partant en France d'un niveau de l'ordre de 10 000 µBq/m³ en mai 86 en ¹³⁷Cs, 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 µBq/m³, témoignant ainsi du potentiel de lessivage de l'atmosphère. De 1988 à 2000, la remise en suspension par érosion éolienne du ¹³⁷Cs 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 ¹³⁷Cs soit équivalent à celui enregistré la veille de l'accident (~ 1 µBq/m³). Depuis 2000, le ¹³⁷Cs n'est plus présent qu'à l'état de traces (~ 0,25 µBq/m³ d'air) dans l'atmosphère 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). Le détail des valeurs obtenues tous les dix jours à partir des huit stations TGD (Figure III. 16) montre

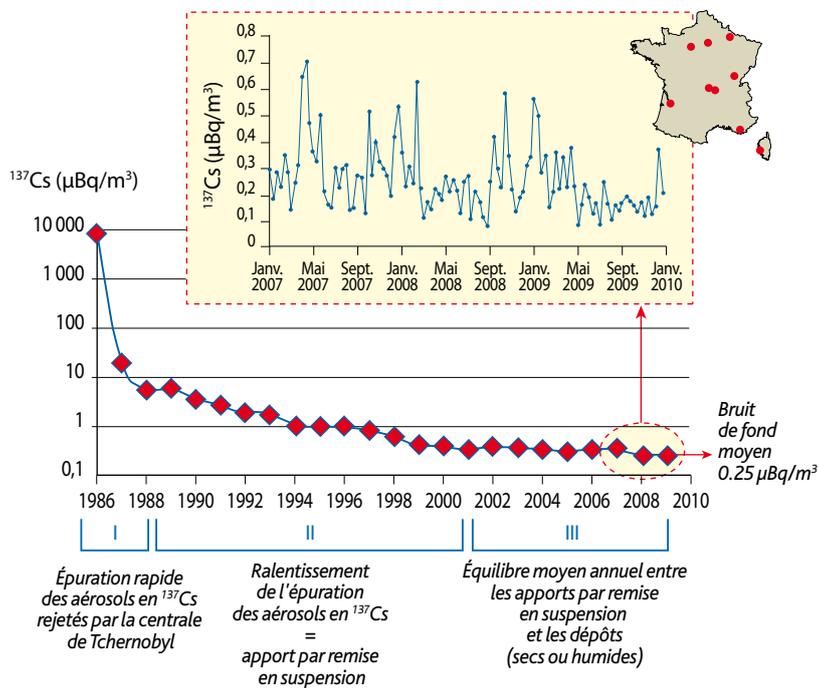


FIGURE III.16 Activité moyenne (métropole et Corse) en césium 137 dans les aérosols atmosphériques de 1986 à aujourd'hui.

cependant des fluctuations, dues à différents phénomènes (feux de biomasse, remise en suspension, épisodes pluvieux...), qu'il est indispensable de quantifier afin d'obtenir une meilleure appréciation de l'évolution des concentrations en situation post-accidentelle.

LES EAUX DE PLUIE

Le lessivage de l'atmosphère par les pluies est le mécanisme le plus efficace pour nettoyer l'atmosphère. Le dépôt mensuel en ^{137}Cs dépend non seulement de la saison, avec un flux de dépôt maximal au printemps (en mai), mais aussi de la localisation. Ainsi, le flux de dépôt mesuré à l'aide d'un pluviomètre du réseau OPERA-Air, est nettement plus important en Corse, en relation avec

le passage fréquent de poussières désertiques en provenance d'Afrique du Nord (environ trois à quatre fois plus d'épisodes que sur le littoral du golfe du Lion), que l'on retrouve souvent sous forme de dépôts humides (Figure III. 17).

Le dispositif actuel de collecteurs d'eaux de pluie dans l'environnement, en dehors de l'influence directe des installations nucléaires, compte douze stations (Figure III. 18). Ce réseau permet de connaître la part de radionucléides qui est lessivée lors des précipitations. Les prélèvements sont réalisés à une fréquence mensuelle.

En 2009, les analyses des prélèvements d'eaux de pluie réalisés hors influence des installations nucléaires, n'ont mis en évidence que la présence du béryllium 7, radionucléide d'origine cosmogénique, comme les années précédentes.

Les installations nucléaires sont surveillées via un réseau de collecteurs (Figure III. 19), disposés sous les vents dominants, où l'eau de pluie est collectée à une fréquence hebdomadaire. Les résultats sont présentés aux Chapitres IV et V.

Dépôts surfaciques en ^{137}Cs (moyenne sur la période 2008-2009)

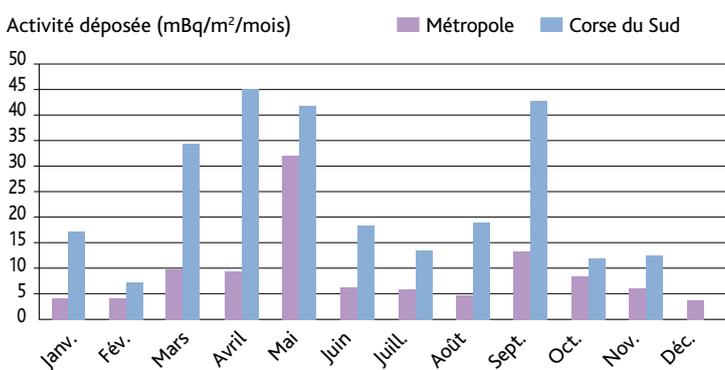


FIGURE III.17 Activité moyenne (métropole et Corse) en ^{137}Cs déposée au sol.



FIGURE III.18 Localisation des points de collecte de pluie.



FIGURE III.19 Collecteur d'eau de pluie.

III.2 LE MILIEU CONTINENTAL

LE MILIEU TERRESTRE

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 ou de constats radiologiques spécifiques.

En complément, une veille régulière des denrées (au moins annuelle) est réalisée à l'échelle départementale. Depuis 2009, un réseau de préleveurs de productions végétales et animales a été déployé sur l'ensemble du territoire avec la contribution des services déconcentrés de la DGAL et de la DGCCRF, permettant également de renforcer en tant que de besoin la surveillance d'une zone géographique. Cette veille radiologique concerne deux principales productions françaises : le lait et les céréales.

Le lait

En complément de la collecte de lait effectuée dans des fermes situées à proximité des installations nucléaires, la collecte provenant de coopératives ou de centres laitiers permet d'acquérir des valeurs de référence représentatives de la production laitière d'origine bovine à l'échelle départementale et d'assurer une veille sanitaire à l'échelle du territoire français.

Les prélèvements sont effectués dans les zones indiquées sur la Figure III.20. Leur fréquence, annuelle par défaut, peut être adaptée aux événements radiologiques observés sur le territoire.

Ce réseau a permis de suivre l'évolution temporelle des sources de contamination du lait en France depuis le début des années 1960 et de situer la contribution due aux rejets des installations nucléaires en exploitation.

Aujourd'hui, la radioactivité mesurée dans le lait est essentiellement d'origine naturelle. En 2009, comme pour les années précédentes, les concentrations en potassium 40 fluctuent, selon le département, entre 34,6 et 68,5 Bq/L.

Parmi les radionucléides d'origine artificielle, des traces de strontium 90, comprises entre $0,030 \pm 0,007$ et $0,208 \pm 0,018$ Bq/L sont observées dans la plupart des échantillons analysés (moyenne annuelle pondérée de $0,046 \pm 0,001$ Bq/L) (Figure III.21). La présence de ce radionucléide, dont les niveaux sont comparables à ceux des échantillons prélevés à proximité des installations, est due essentiellement aux retombées atmosphériques anciennes des tirs aériens.

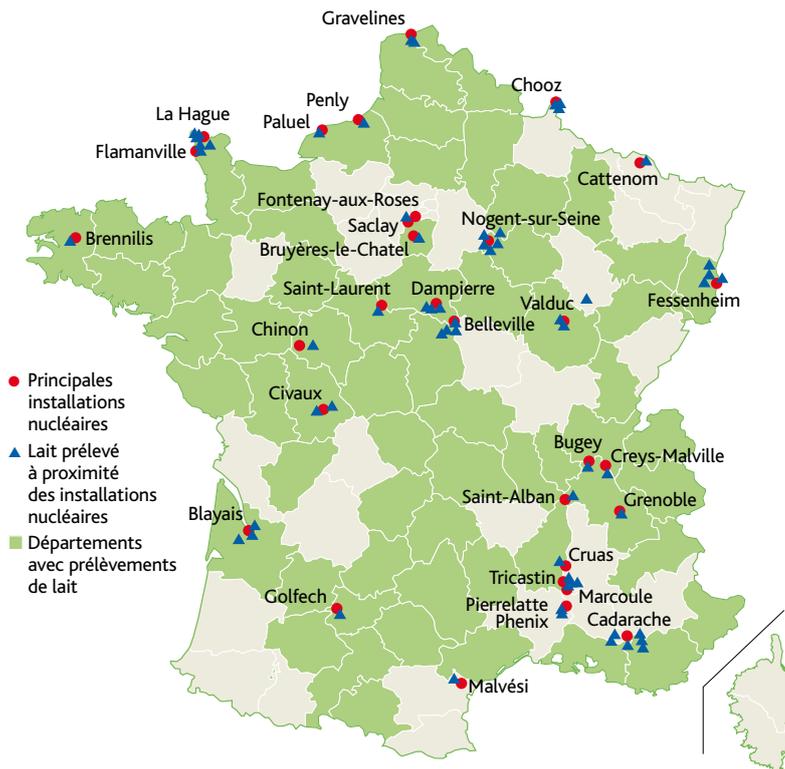


FIGURE III.20 Zones de collecte de lait en 2009.

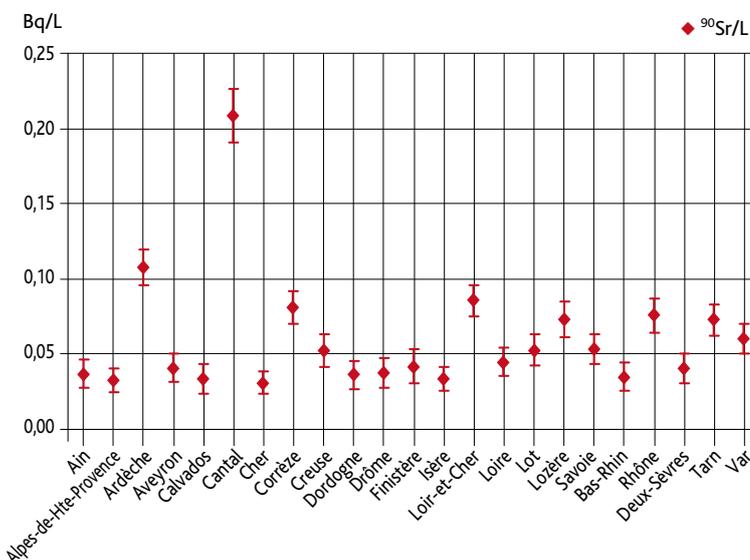


FIGURE III.21 Activités significatives en ⁹⁰Sr dans le lait collecté en 2009 à l'échelle départementale.

Nota : Les mesures de strontium 90 ont été réalisées sur quelques échantillons, car celles-ci nécessitent un traitement chimique préalable délicat à réaliser sur du lait frais. Les résultats disponibles pour 23 départements permettent de disposer d'une gamme de concentration à l'échelle du territoire français.

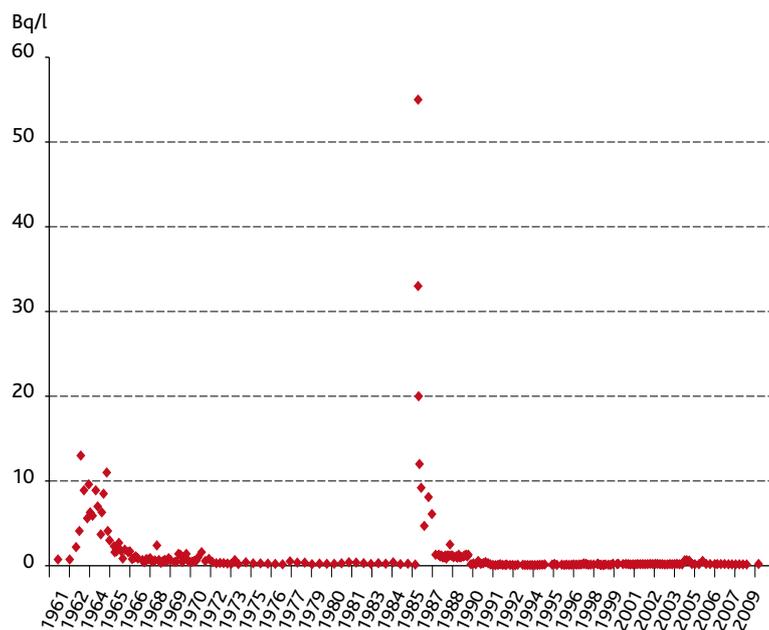


FIGURE III.22 Activités en ^{137}Cs dans le lait analysé dans le département de l'Allier.

En 2009, seul l'échantillon de lait de bovin collecté en Ardèche présente en métropole une activité en césium 137 légèrement supérieure aux limites de détection ($0,28 \pm 0,10$ Bq/L). Ces traces sont imputables essentiellement aux retombées passées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl en 1986, année durant laquelle les activités dans le lait ont pu atteindre ponctuellement plusieurs dizaines de Bq/L (Figure III.22). En dehors de ce point, les niveaux d'activités pour ce radionucléide sont inférieurs aux limites de détection ($< 0,5$ Bq/L). Les activités des autres radionucléides sont restées inférieures aux limites de détection ($< 0,93$ Bq/L pour le césium 134).

Les céréales

La surveillance du blé en métropole est assurée grâce à la contribution de France Agrimer qui prélève des échantillons provenant de 210 sols répartis sur l'ensemble du territoire. Les échantillons sont ensuite regroupés en 21 mélanges régionaux selon une répartition climatique.

Cette surveillance régionale complète celle réalisée aux abords des principales installations nucléaires dont les résultats sont présentés par installation aux Chapitres IV et V. Le Tableau III.1 présente les résultats d'analyse par regroupement régional.

TABLEAU III.1 Activités mesurées dans les échantillons de blé de la récolte 2009 – Mélanges régionaux.

| Regroupement régional | Activité massique (Bq/kg frais) | | | | | | |
|----------------------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | ^{40}K | ^{54}Mn | ^{58}Co | ^{60}Co | ^{90}Sr | ^{134}Cs | ^{137}Cs |
| Picardie | $116,77 \pm 15,50$ | $< 0,58$ | $< 1,28$ | $< 0,49$ | $0,12 \pm 0,02$ | $< 0,57$ | $< 0,47$ |
| Haute-Normandie | $114,87 \pm 16,83$ | $< 0,55$ | $< 1,53$ | $< 0,45$ | $0,14 \pm 0,02$ | $< 0,47$ | $< 0,45$ |
| Nord-Pas-de-Calais | $82,23 \pm 14,17$ | $< 0,43$ | $< 0,99$ | $< 0,36$ | $0,07 \pm 0,01$ | $< 0,44$ | $< 0,36$ |
| Champagne-Ardenne | $106,38 \pm 15,83$ | $< 0,58$ | $< 1,14$ | $< 0,56$ | $0,15 \pm 0,02$ | $< 0,54$ | $< 0,53$ |
| Lorraine | $111,79 \pm 15,90$ | $< 0,59$ | $< 1,71$ | $< 0,51$ | $0,13 \pm 0,02$ | $< 0,45$ | $< 0,48$ |
| Alsace | $93,62 \pm 16,18$ | $< 0,74$ | $< 2,76$ | $< 0,59$ | $0,11 \pm 0,02$ | $< 0,54$ | $< 0,56$ |
| Île-de-France | $103,39 \pm 17,11$ | $< 0,56$ | $< 1,02$ | $< 0,52$ | $0,15 \pm 0,02$ | $< 0,48$ | $< 0,54$ |
| Basse-Normandie | $102,44 \pm 15,07$ | $< 0,54$ | $< 1,38$ | $< 0,52$ | $0,19 \pm 0,02$ | $< 0,42$ | $< 0,49$ |
| Bretagne | $103,27 \pm 16,15$ | $< 0,57$ | $< 1,87$ | $< 0,52$ | $0,21 \pm 0,02$ | $< 0,41$ | $< 0,50$ |
| Pays de la Loire | $132,46 \pm 18,97$ | $< 0,65$ | $< 2,43$ | $< 0,50$ | $0,2 \pm 0,02$ | $< 0,49$ | $< 0,45$ |
| Franche-Comté | $93,97 \pm 17,90$ | $< 0,59$ | $< 1,19$ | $< 0,56$ | $0,28 \pm 0,03$ | $< 0,53$ | $< 0,54$ |
| Auvergne | $94,32 \pm 16,41$ | $< 0,51$ | $< 1,53$ | $< 0,43$ | $0,14 \pm 0,02$ | $< 0,37$ | $< 0,39$ |
| Limousin | $119,89 \pm 12,50$ | $< 0,57$ | $< 1,33$ | $< 0,51$ | $0,53 \pm 0,06$ | $< 0,52$ | $< 0,44$ |
| Rhône-Alpes | $107,37 \pm 15,55$ | $< 0,58$ | $< 1,73$ | $< 0,51$ | $0,27 \pm 0,03$ | $< 0,42$ | $< 0,42$ |
| Languedoc-Roussillon | $127,92 \pm 0,18$ | $< 0,69$ | $< 2,59$ | $< 0,52$ | $< 0,09$ | $< 0,48$ | $< 0,51$ |
| Poitou-Charentes | $127,35 \pm 18,89$ | $< 0,63$ | $< 2,21$ | $< 0,46$ | $0,24 \pm 0,03$ | $< 0,48$ | $< 0,42$ |
| Aquitaine | $110,47 \pm 17,96$ | $< 0,66$ | $< 1,94$ | $< 0,54$ | $0,15 \pm 0,02$ | $< 0,46$ | $< 0,53$ |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | $128,57 \pm 18,15$ | $< 0,68$ | $< 2,73$ | $< 0,55$ | $0,20 \pm 0,02$ | $< 0,50$ | $< 0,50$ |
| Bourgogne | $100,81 \pm 19,45$ | $< 0,58$ | $< 1,16$ | $< 0,58$ | $0,25 \pm 0,03$ | $< 0,50$ | $< 0,55$ |
| Centre | $103,13 \pm 16,19$ | $< 0,60$ | $< 1,43$ | $< 0,48$ | $0,14 \pm 0,02$ | $< 0,50$ | $< 0,49$ |
| Midi-Pyrénées | $135,26 \pm 19,04$ | $< 0,67$ | $< 2,62$ | $< 0,51$ | $0,22 \pm 0,02$ | $< 0,58$ | $< 0,48$ |

Comme pour les années antérieures, les analyses réalisées en 2009 sur les grains entiers indiquent la rémanence de strontium 90, seul radionucléide d'origine artificielle quantifiable, dont la présence est principalement attribuée aux retombées atmosphériques liées aux essais aériens d'armes nucléaires. La Figure III.23 illustre la décroissance de l'activité en strontium 90 (de demi-vie 28,78 ans) dans les céréales de 1969 à aujourd'hui, toutes régions confondues.

Les niveaux de radioactivité de l'environnement français

Les données acquises par l'IRSN sur l'ensemble du territoire au titre de la surveillance radiologique de l'environnement ou dans le cadre d'études spécifiques permettent d'établir les niveaux d'activités présents aujourd'hui dans le milieu terrestre.

La Figure III.24 précise les gammes d'activités mesurées pour cinq principaux radionucléides artificiels (²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ³H et ¹⁴C) dans sept denrées représentatives de la chaîne alimentaire : la salade, les céréales, le vin, le lait de vache, la viande, les poissons de fleuve et des moules de Méditerranée.

Les activités sont extrêmement variables d'un radionucléide à l'autre et s'étalent sur près de sept ordres de grandeur. Ainsi, les activités de ¹⁴C les plus élevées, comprises le plus souvent entre 10 Bq/kg et 100 Bq/kg, sont 10 000 à plus de 1 million de fois supérieures à celles de ²³⁹⁺²⁴⁰Pu. Ces dernières sont le plus souvent inférieures à 1 mBq/kg (0,001 Bq/kg).

En revanche, pour un même radionucléide, les activités varient peu d'une denrée à l'autre. Par contre, au sein d'une même denrée, les activités de ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr et ²³⁹⁺²⁴⁰Pu mesurées sur l'ensemble du territoire couvrent chacune deux à trois ordres de grandeur sans qu'il ne soit plus

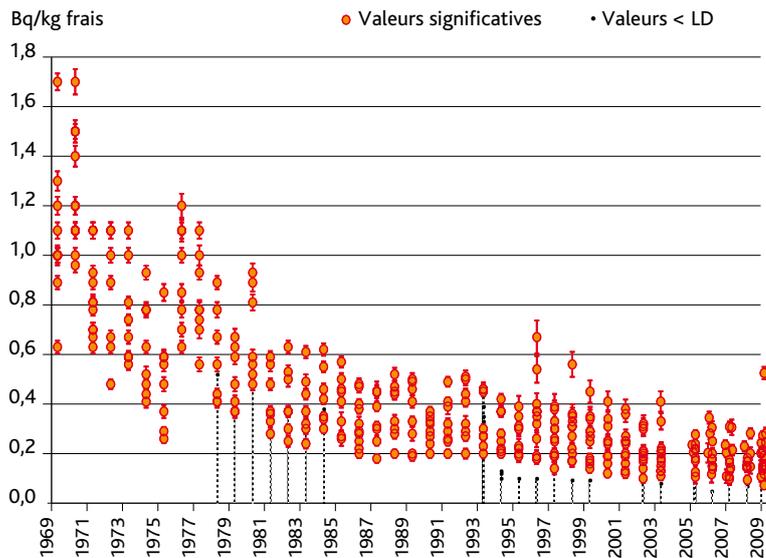


FIGURE III.23 Activités en ⁹⁰Sr mesurées sur les échantillons de blé de 1969 à 2009 (toutes régions confondues).

possible de discriminer statistiquement d'effet régional. L'origine des radionucléides artificiels et les transferts radioécologiques expliquent cette variabilité.

Les gammes d'activités indiquées sur ce graphique sont représentatives du « bruit de fond » en France et plus largement en Europe de l'Ouest pour les radionucléides considérés. Sous l'influence des rejets industriels de certaines installations nucléaires, des activités plus élevées peuvent être localement mesurées.

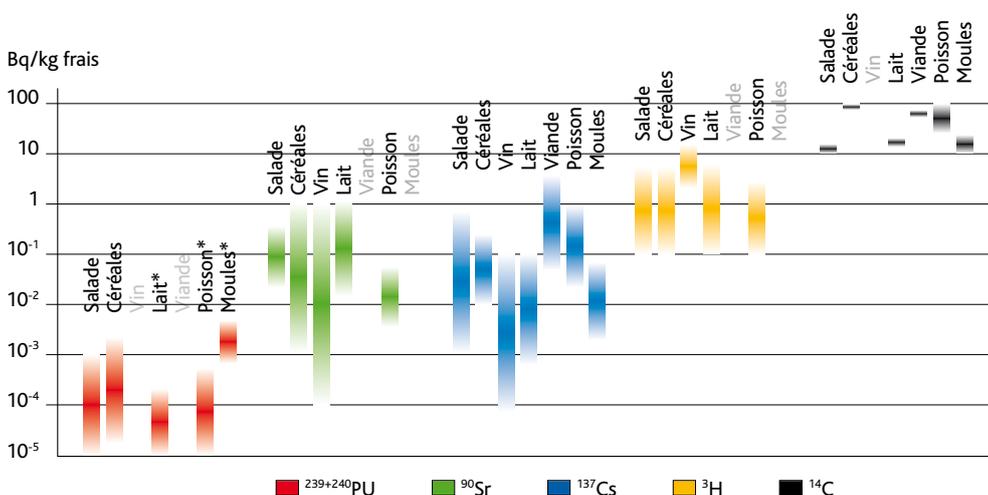


FIGURE III.24 Gammes des activités actuelles des radionucléides artificiels les plus couramment observés dans sept denrées radiologiquement représentatives de la chaîne alimentaire.

LES COURS D'EAU (FLEUVES ET RIVIÈRES)

Pour la surveillance des rivières et des fleuves, un dispositif d'une trentaine d'hydrocollecteurs permettant des prélèvements semi-automatisés est déployé sur l'ensemble du territoire. Cette surveillance est complétée par un dispositif automatisé de télémessure de la radioactivité qui assure une mesure en continu : le réseau Hydrotéléray (Figure III.25).

Le réseau de prélèvements par hydrocollecteurs

Au niveau de chaque hydrocollecteur, l'eau est pompée par un dispositif automatique qui alimente en permanence un bac de décantation. Après décantation des matières en suspension au fond du bac, les boues sont récupérées et analysées mensuellement. L'eau du bac est pompée au rythme moyen de 15 ml par heure pour générer un échantillon d'environ 2 litres tous les six jours, transféré mensuellement en laboratoire, où les fractions d'eau brute et filtrée à 0,45 µm sont analysées (Figure III.26).

En plus des hydrocollecteurs et des points de prélèvements localisés en aval immédiat des installations nucléaires (résultats détaillés aux Chapitres IV et V), cinq stations sont implantées en des points éloignés, en aval ou en amont :

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



FIGURE III.25 Implantation des stations Hydrotéléray et des hydrocollecteurs en 2009.



FIGURE III.26 Détail du dispositif de prélèvement d'eau par un hydrocollecteur.

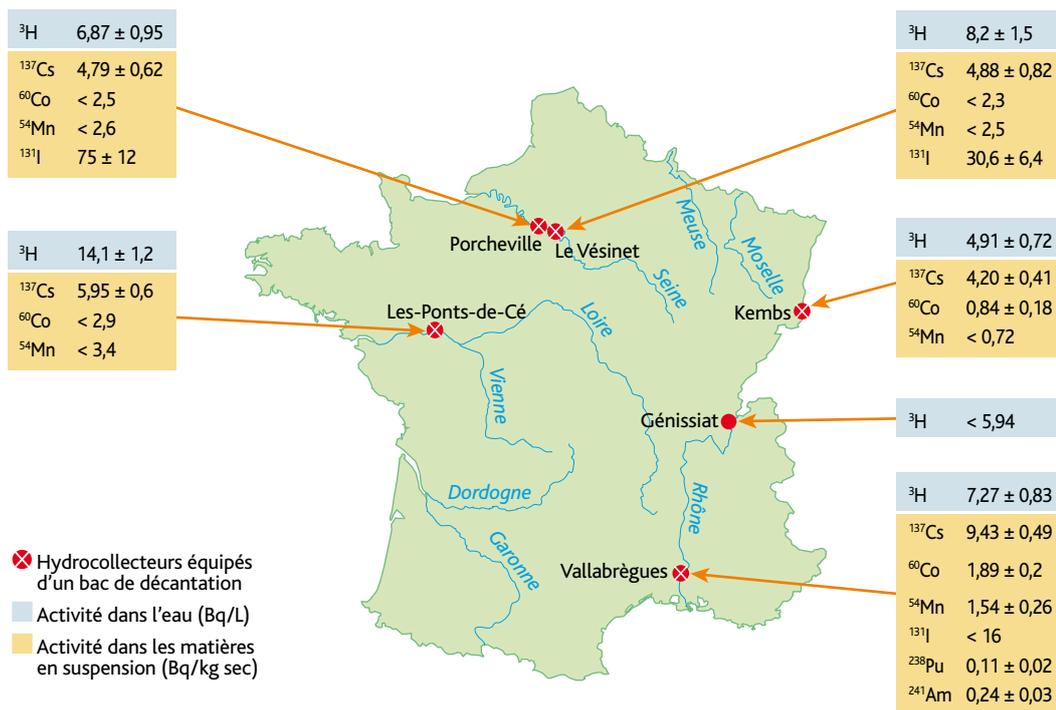


FIGURE III.27 Activités mesurées dans les eaux et les MES décantées collectées en 2009 par les hydrocollecteurs implantés en champ éloigné des installations nucléaires.

De l'ensemble des résultats de radioactivité mesurée en 2009 au niveau des stations situées en champ éloigné d'une installation nucléaire (Figure III.27), il ressort :

- un marquage en tritium en aval hydraulique des rejets d'effluents liquides des installations nucléaires. Ce marquage diffère en fonction des niveaux de rejets des installations et des caractéristiques hydrologiques des cours d'eaux récepteurs. À titre d'information, bien que ces eaux de fleuve ne soient pas destinées à la consommation humaine, en 2009, les concentrations en tritium sont comprises en moyenne entre 5,9 et 14,1 Bq/L (valeur inférieure à la référence de qualité de 100 Bq/L, recommandée par le code de la santé publique – CSP – pour les eaux d'adduction destinées à la consommation humaine) ;
- que l'activité alpha global se situe en moyenne entre 0,02 et 0,04 Bq/L et s'explique par la teneur en uranium d'origine naturelle présente dans les cours d'eau. Ces résultats sont inférieurs à la valeur guide de 0,1 Bq/L, recommandée par le CSP ;
- que l'activité bêta global moyenne, comprise entre 0,08 et 0,15 Bq/L, est inférieure à la valeur guide de 1 Bq/L, recommandée par le CSP.

- que les niveaux de césium 137 sont du même ordre de grandeur que ceux observés les années précédentes et ne diffèrent pas significativement d'un cours d'eau à l'autre (activité massique comprise entre 4,2 à 9,4 Bq/kg sec). La présence de ce radionucléide s'explique principalement par les retombées atmosphériques passées ;
- la présence de produits d'activation et de fission, tels que le cobalt 60 ou le manganèse 54, est parfois détectée en aval hydraulique des CNPE du Rhône ;
- que des traces de plutonium 238 et d'américium 241 sont mesurées à la station de Vallabrègues. Elles s'expliquent par les rejets liquides anciens des installations des sites de Marcoule et Pierrelatte, mais également par les retombées atmosphériques passées ;
- que de l'iode 131 est régulièrement mesuré en aval de grandes agglomérations disposant d'activités de médecines nucléaires. Ainsi en 2009, des niveaux d'une dizaine à quelques dizaines de Bq/kg sec ont été mesurés dans le Rhône et la Seine.

Les résultats des analyses réalisées sur des prélèvements localisés immédiatement en aval des installations nucléaires sont détaillées au Chapitre IV.

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, en aval de toute installation nucléaire aux Ponts-de-Cé (Angers) sur la Loire, à Croissy-sur-Seine sur la Seine, à Vallabrègues (Arles) sur le Rhône, à Vogelgrün sur le Rhin, à Rancennes sur la Meuse, à Boé (Agen) sur la Garonne et à Apach sur la Moselle.

Ce réseau 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 est composé 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 limites de détection sont d'environ 0,5 à 1 Bq/L pour les ¹³⁷Cs, ¹³¹I et ⁶⁰Co. 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.

En 2009, les seuls radionucléides détectés de manière épisodique sont d'origine naturelle : notamment le plomb 214 et le bismuth 214, issus de la filiation du radon 222, ainsi que le potassium 40.



FIGURE III.28 Station Hydrotéléray d'Agen.

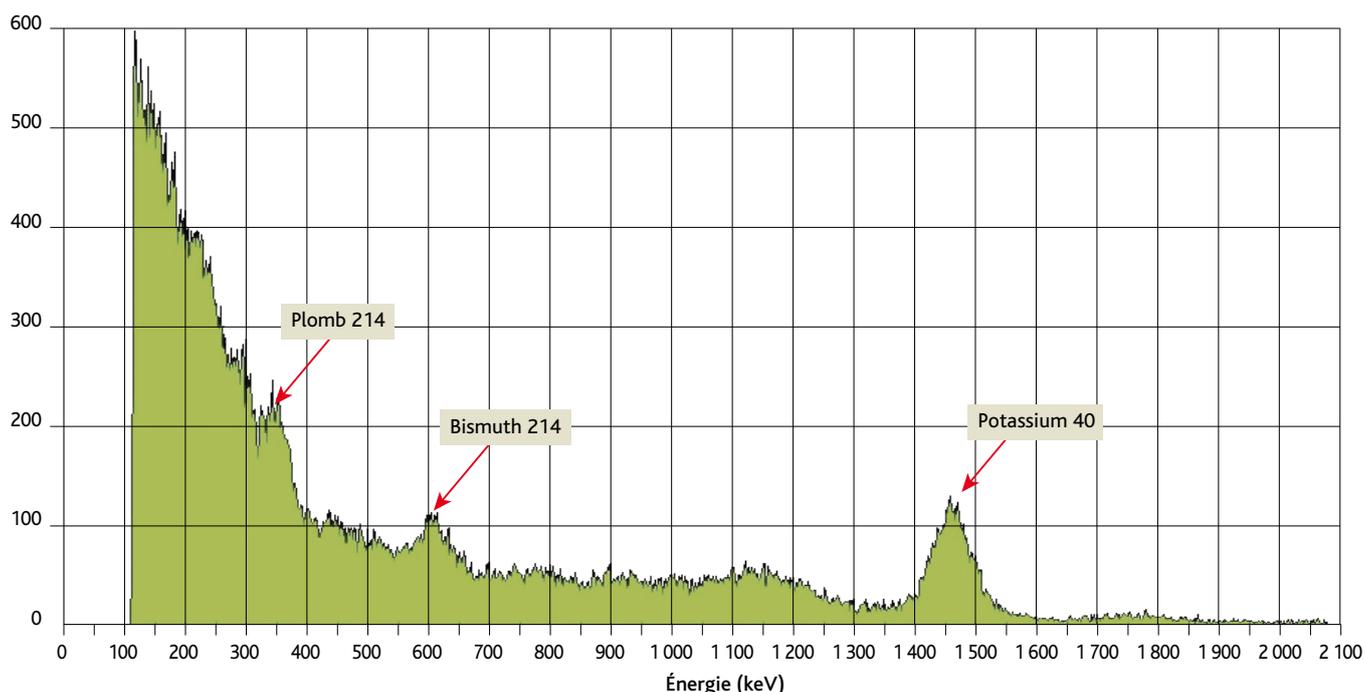


FIGURE III.29 Spectre enregistré par la station d'Angers lors d'un événement orageux.

LA STATION OBSERVATOIRE DU RHÔNE EN ARLES : UNE PLATE-FORME INSTRUMENTÉE POUR LE SUIVI DES FLUX DE RADIOACTIVITÉ EN TRANSIT DANS LE RHÔNE

Depuis 2005, la Station Observatoire du Rhône en Arles (SORA) permet de réaliser le suivi des flux de radioactivité exportés par le fleuve vers la Méditerranée.

Les prélèvements d'eaux du Rhône sont effectués selon le protocole suivant :

– hors période de crue, un échantillon mensuel composite est réalisé à partir de prélèvements horaires ;

– en période de crue, lorsque le débit du Rhône dépasse le seuil de 3 000 m³/s, l'échantillon composite est réalisé à partir de prélèvements réalisés toutes les 20 minutes durant 8 heures.

Dans chaque échantillon sont analysés les radionucléides dissous dans l'eau et ceux fixés aux matières en suspension (MES) dans l'eau.

Depuis 2008, outre les radionucléides émetteurs gamma (¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ⁵⁴Mn, ^{110m}Ag et ¹²⁵Sb notamment), six radionucléides supplémentaires ont été analysés : ³H, ⁹⁰Sr, ²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et ²⁴¹Am. Ainsi en 2008, des bilans de flux ont pu être réalisés pour la première fois pour les dix principaux radionucléides artificiels qui transitent dans le Rhône (¹⁴C excepté).



Photos de la station de prélèvement d'Arles : prise d'eau (ci-dessus) et banc de filtration des événements de crue (ci-contre).



Le flux le plus important est celui du tritium libre, 293 ± 48 TBq pour l'année 2008. Cette valeur est même très supérieure au flux du radionucléide naturel le plus abondant : le ⁴⁰K (flux de $6,7 \pm 0,7$ TBq). Le tritium provient principalement des rejets des installations nucléaires rhodaniennes. Viennent ensuite, mais avec des niveaux 3 000 fois inférieurs, le ⁹⁰Sr (106 ± 21 GBq) et ¹³⁷Cs (104 ± 10). Les flux de ⁶⁰Co, ¹²⁵Sb et ⁵⁴Mn sont compris entre 5 et 13 GBq. Les flux

d'actinides, (isotopes du plutonium et ²⁴¹Am), sont les plus faibles, de l'ordre de 0,3 à 1 GBq.

Pour les ⁶⁰Co et ¹²⁵Sb, déjà analysés en 2007, les flux de 2008 sont proches de ceux de 2007, en relation avec la stabilité des rejets industriels.

Pour les ¹³⁷Cs, le flux estimé pour 2008 est nettement supérieur à celui de 2007 (53 GBq).



Cet écart est à mettre en relation avec des crues plus fréquentes et importantes qu'en 2007. Lors des crues, la charge de MES augmente du fait du drainage des sols du bassin versant et de la remise en suspension des sédiments. En 2008, 9,1 10⁶ tonnes de MES ont ainsi transité dans le Rhône, soit six fois plus qu'en 2007. Il faut remonter à 1999 pour trouver un flux de MES aussi important. 81 % de cette charge ont transité lors de six crues d'une durée totale de 23 jours (6 % du temps), durant lesquelles le débit du Rhône à Arles a dépassé 3 000 m³/s (débit maximal journalier de 4 800 m³/s le 3 novembre 2008). Durant ces crues, 36 GBq de ¹³⁷Cs ont transité, ce qui représente 40 % du flux annuel de ce radionucléide.

Bien que le ⁹⁰Sr et les actinides soient analysés pour la première fois, il est probable que pour ces radionucléides très liés aux MES (près de 100 % pour le plutonium et plus de 60 % pour le ⁹⁰Sr) et dont l'origine est essentiellement liée aux stocks dans les sols et les sédiments, les flux estimés en 2008 soient également parmi les plus élevés susceptibles d'être observés.

La comparaison des flux d'activités estimées en Arles et les activités rejetées par l'industrie nucléaire montrent que les radionucléides spécifiques des seuls rejets de l'industrie nucléaire (⁶⁰Co, ¹²⁵Sb et ⁵⁴Mn) sont rapidement exportés en Méditerranée. On observe par ailleurs un excédent à Arles pour le ¹³⁷Cs, les isotopes du Pu, l'²⁴¹Am et pour le ⁹⁰Sr qui témoigne des apports du bassin-versant rhodanien marqués par les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et celles de l'accident de Tchernobyl. Enfin, le flux annuel de tritium libre, estimé à partir des données acquises par SORA, est largement excédentaire par rapport aux rejets connus de l'industrie nucléaire. Parmi les origines potentielles de cet excédent de tritium, sont envisagés : des apports depuis le bassin versant provenant de sources non identifiées, une contribution des rejets atmosphériques rabattus par les pluies, des échanges entre des nappes d'eau marquées en tritium et le Rhône, et la diffusion de tritium depuis les sédiments vers la colonne d'eau.

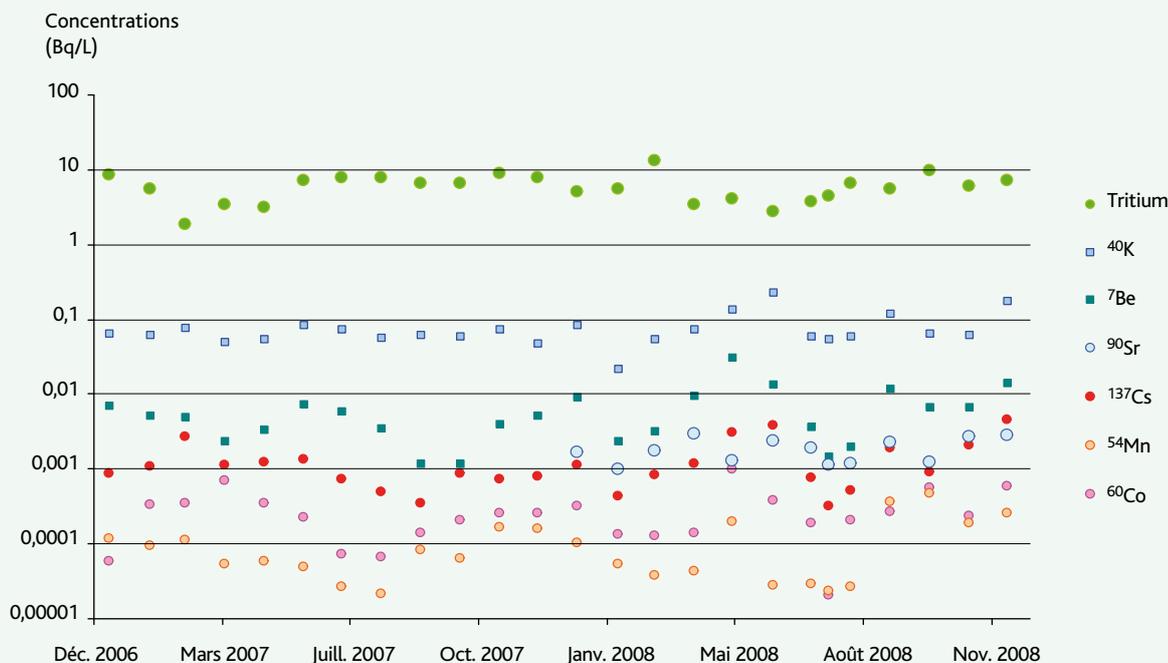


FIGURE III.30 Évolution des concentrations volumiques des principaux radionucléides artificiels mesurés dans les eaux du Rhône (le ⁴⁰K, radionucléide d'origine naturelle le plus abondant dans les eaux du fleuve, est représenté à titre d'information) au cours des années 2007 et 2008.

III.3 LE LITTORAL

La surveillance du milieu marin est réalisée à partir de stations côtières de prélèvements distribuées sur toutes les façades maritimes du territoire. Le nombre de stations et leur position sont conditionnés par la volonté d'assurer une bonne couverture géographique mais aussi par la proximité d'installation nucléaire et par la réalisation de programme d'études spécifiques (dans la Méditerranée par exemple). 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 (voir les résultats au Chapitre IV) ;
- 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 leur domaine maritime. Les résultats de ces stations sont présentés dans le présent chapitre.

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 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 bio-indicateurs contribue à alimenter en données l'observatoire alimentaire mis en place en 2009 en partenariat de la DGAL et de la DGCCRF.

Avec l'apport de la simulation (voir Focus « Intérêt de la modélisation de la dispersion pour la surveillance en milieu marin ») et les informations acquises durant de nombreuses années par les différents laboratoires de l'IRSN, le déploiement de cette surveillance a été optimisé en 2009 avec une redéfinition globale des prélèvements (points et nature). Certaines mesures ont également fait l'objet d'améliorations significatives (^3H et ^{137}Cs dans l'eau de mer notamment).

FOCUS

INTÉRÊT DE LA MODÉLISATION DE LA DISPERSION POUR LA SURVEILLANCE EN MILIEU MARIN

En milieu marin, l'interprétation des résultats de mesure rencontre une difficulté du fait des processus complexes de dispersion des radionucléides depuis la source jusqu'au lieu de collecte des échantillons. Cette difficulté peut être levée grâce à des modèles de dispersion des substances solubles.

De tels modèles pour la Manche et la Mer du Nord sont mis au point et validés par des mesures de radiotraceurs dans le cadre d'une collaboration entre l'Ifremer et l'IRSN (Figure III.31). Bien que moins précis, dans le golfe de Gascogne ces modèles donnent des résultats exploitables. ●●●

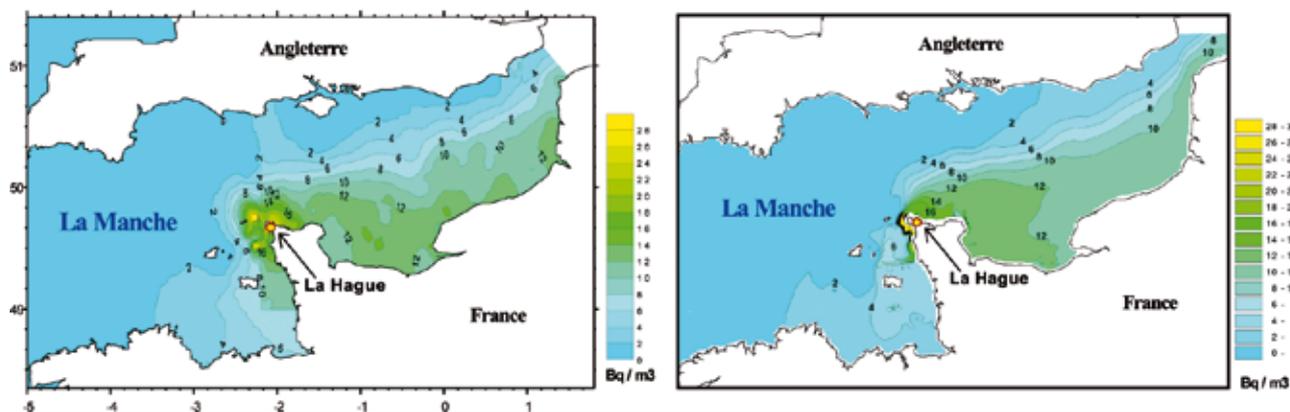


FIGURE III.31 Impact moyen de rejets de l'usine AREVA-NC pour un rejet constant de $1 \text{ MBq}\cdot\text{s}^{-1}$, comparaison modèle/mesures pour l'antimoine 125.

Ces modèles permettent aussi de calculer les concentrations dans les compartiments biologiques et particulaires. Les résultats obtenus sont en très bonne cohérence avec les mesures de surveillance réalisées dans les différentes matrices de l'environnement aux mêmes lieux et dates (Figure III.32).

Les simulations faites à partir de ces modèles peuvent être actualisées quotidiennement suivant l'évolution de la météorologie et de la marée. Les développements en cours permettront d'intégrer les variations des flux de radionucléides rejetés par les installations nucléaires.

L'objectif est de disposer, au terme de ces développements (projet STERNE « Simulation de crise du transport d'éléments radioactifs en environnement marin »), d'outils opérationnels permettant d'actualiser l'état radiologique sur le plateau continental nord-ouest européen (Figure III.33). Cette capacité opérationnelle prendrait toute son importance lors d'un rejet accidentel de radioactivité en mer.

Ces outils de simulation permettront d'affiner l'interprétation des résultats de la surveillance et d'en optimiser la stratégie. Ils permettront aussi d'évaluer les concentrations dans l'environnement pour des radionucléides, dans des lieux et à des moments inaccessibles à la mesure.

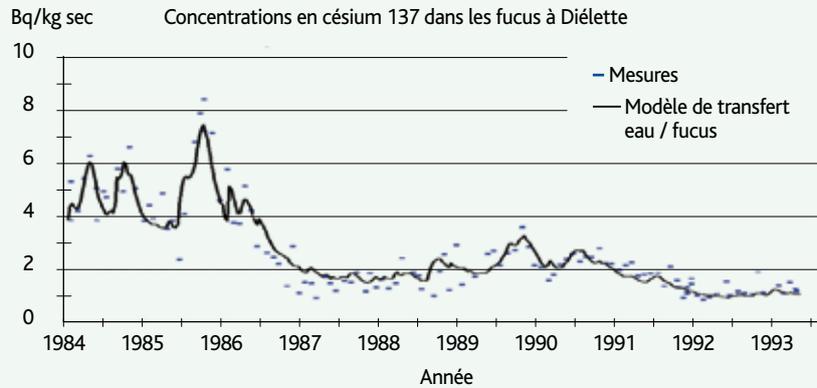


FIGURE III.32 Simulation des transferts de radionucléides dans les algues : comparaison modèle/mesures.

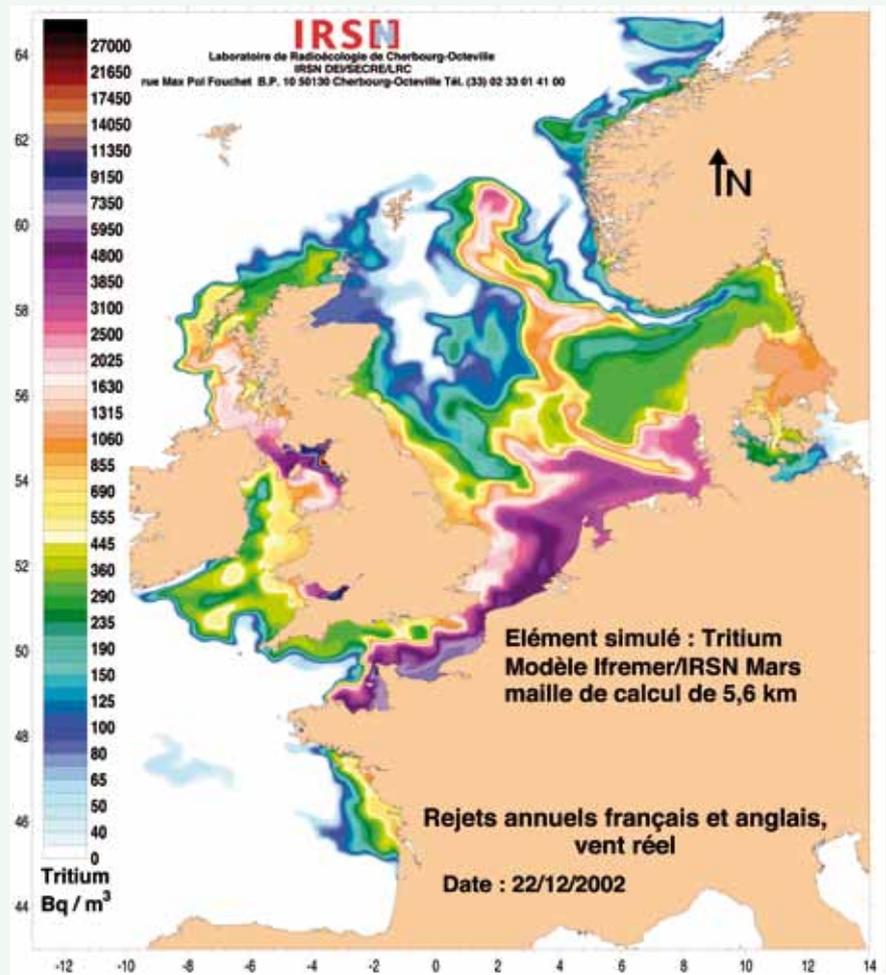


FIGURE III.33 Simulation de la dispersion du tritium sur le plateau continental nord-ouest européen.

**LE LITTORAL ATLANTIQUE –
MANCHE – MER DU NORD**

Des prélèvements d'échantillons de natures différentes ont été réalisés en 2009 au niveau du littoral atlantique, de la mer du Nord et de la Manche (Figure III.34).

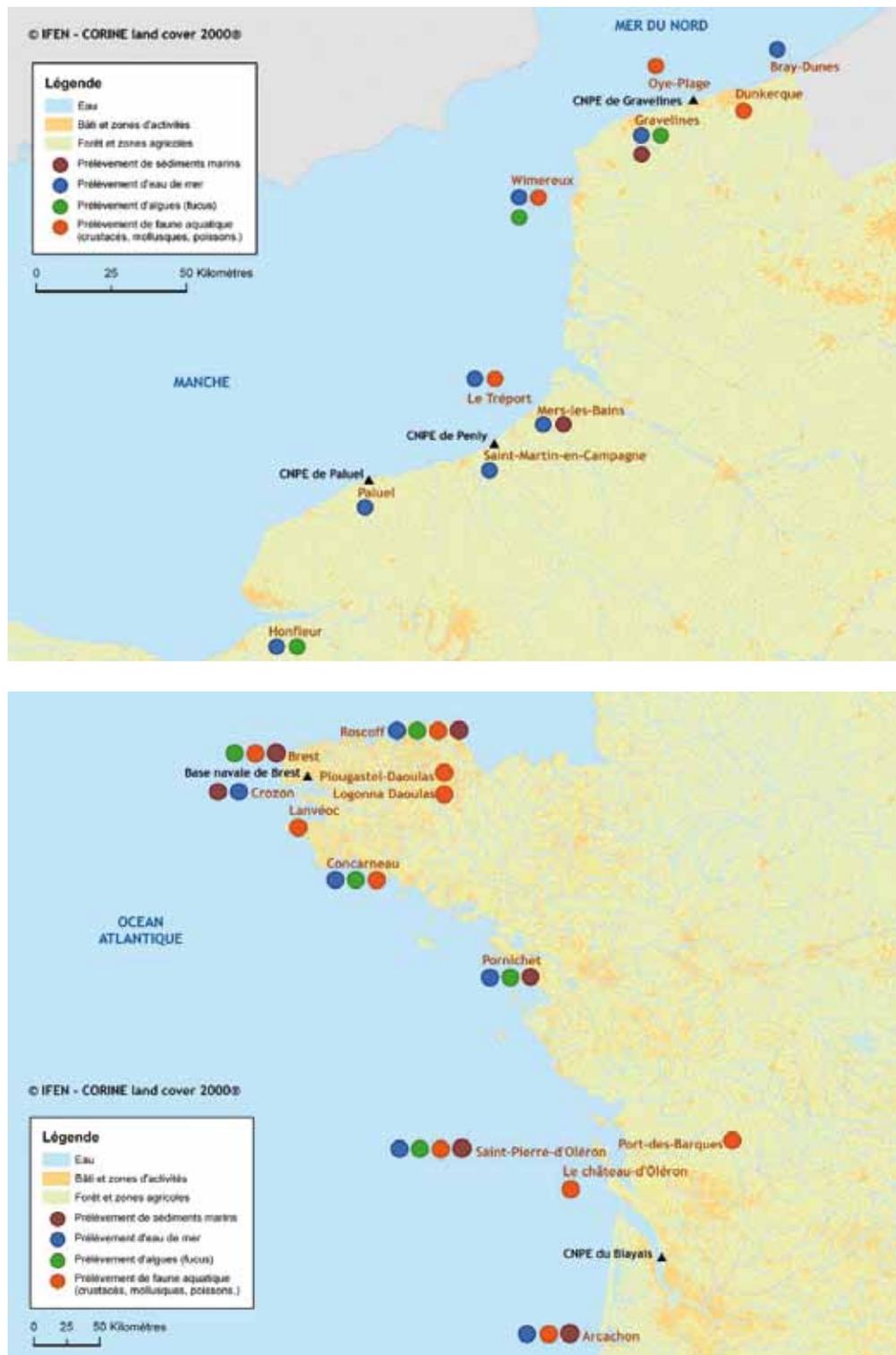


FIGURE III.34 Localisation des stations de prélèvements IRSN en Atlantique et mer du Nord.

Eau de mer

La radioactivité naturelle de l'eau de mer est de l'ordre de 13 Bq/L, essentiellement due au potassium 40. S'y ajoute la radioactivité artificielle, dont le césium 137 est, avec le tritium, l'un des principaux éléments contributeurs.

Césium 137

Le comptage direct de l'eau de mer en spectrométrie gamma ne permet pas, dans la plupart des cas, la détection du césium 137. Sa mesure impose au préalable une concentration détaillée dans le Focus ci-après.

Les concentrations en ^{137}Cs mesurées en 2009 dans l'eau de mer sont généralement inférieures à 1 mBq/L en champ éloigné des activités nucléaires, à Arcachon, Oléron, Pornichet, Wimereux et Concarneau (*Figure III.36*). À titre de comparaison, les concentrations en ^{137}Cs dans les eaux de surface de l'océan Pacifique Sud sont de l'ordre de 0,1 mBq/L.

Le sud de la façade atlantique apparaît légèrement moins marqué que le nord et la Manche, en particulier à proximité de l'usine AREVA de La Hague.

L'activité du ^{137}Cs dans l'eau de mer prélevée à Goury, à proximité de l'usine AREVA de La Hague, en 2009, s'élève à $1,36 \pm 0,37$ mBq/L. En tenant compte des incertitudes liées aux mesures, cette valeur n'est pas significativement différente des stations de référence situées à Concarneau et Wimereux. Toutefois, l'activité tend à décroître avec l'éloignement par rapport à l'usine de La Hague. Ainsi à l'est, au Tréport, est mesurée une activité en ^{137}Cs de $1,30 \pm 0,30$ mBq/L, et à Wimereux, une activité de $0,96 \pm 0,21$ mBq/L.

Il faut souligner que, corrélativement à la baisse des rejets de l'usine de retraitement de combustibles usés de La Hague, les teneurs en ^{137}Cs dans des eaux côtières influencées par ces rejets ont fortement diminué au cours des dernières décennies. Elles variaient de 30 à 50 mBq/L durant les années 80 contre 1 à 2 mBq/L aujourd'hui.

MESURE DU ^{137}Cs DANS L'EAU DE MER

Dans le milieu marin, le ^{137}Cs a essentiellement un comportement d'élément soluble. Il est mesurable par spectrométrie γ à partir de la raie d'émission de son fils, le ^{137m}Ba , émetteur γ .

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 ^{137}Cs 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 (^{134}Cs et ^{137}Cs) 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 coprécipitation du dioxyde de manganèse MnO_2 et du ferrocyanure double de cobalt et de potassium $\text{K}_2[\text{CoFe}(\text{CN})_6]$ (appelé plus couramment KCFC), afin de mesurer leur activité par spectrométrie gamma.

Les principaux radionucléides artificiels pouvant être analysés sont : ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{106}Rh , ^{110m}Ag , ^{124}Sb , ^{125}Sb , ^{134}Cs et ^{137}Cs . Ces radionucléides seront fixés au précipité. Le mode opératoire est illustré sur les figures ci-contre.



1- Prélèvement de 120 L d'eau de mer (ici à Arcachon).



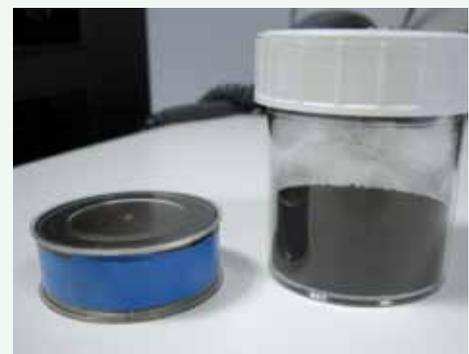
3- Décantation.



2- Coprécipitation.



4- Broyage de précipité séché.



5- Mise en géométrie de comptage.

FIGURES III.35

Tritium

Les échantillons prélevés sur la façade atlantique à Arcachon, qui constitue une station de référence située en champ éloigné des sites nucléaires, ont été analysés par décroissance de l'hélium 3 qui permet d'atteindre une limite de détection de l'ordre de 1 à 10 mBq/L, plus basse que l'analyse par scintillation liquide. Les activités en tritium mesurées à Arcachon (0,16 Bq/L) sont représentatives du bruit de fond très bas observé au niveau de l'océan Atlantique.

Les activités du tritium mesurées en mer du Nord et en Manche montrent l'influence des activités nucléaires de l'usine AREVA de La Hague ainsi que des CNPE situés sur le littoral, avec des valeurs moyennes comprises entre 6,4 et 11 Bq/L (Figure III.36).

L'activité en tritium mesurée à Pornichet de 7,6 Bq/L est liée à l'influence des installations nucléaires situées sur le bassin versant de la Loire (Chapitre IV) dont l'embouchure est située à Saint-Nazaire.

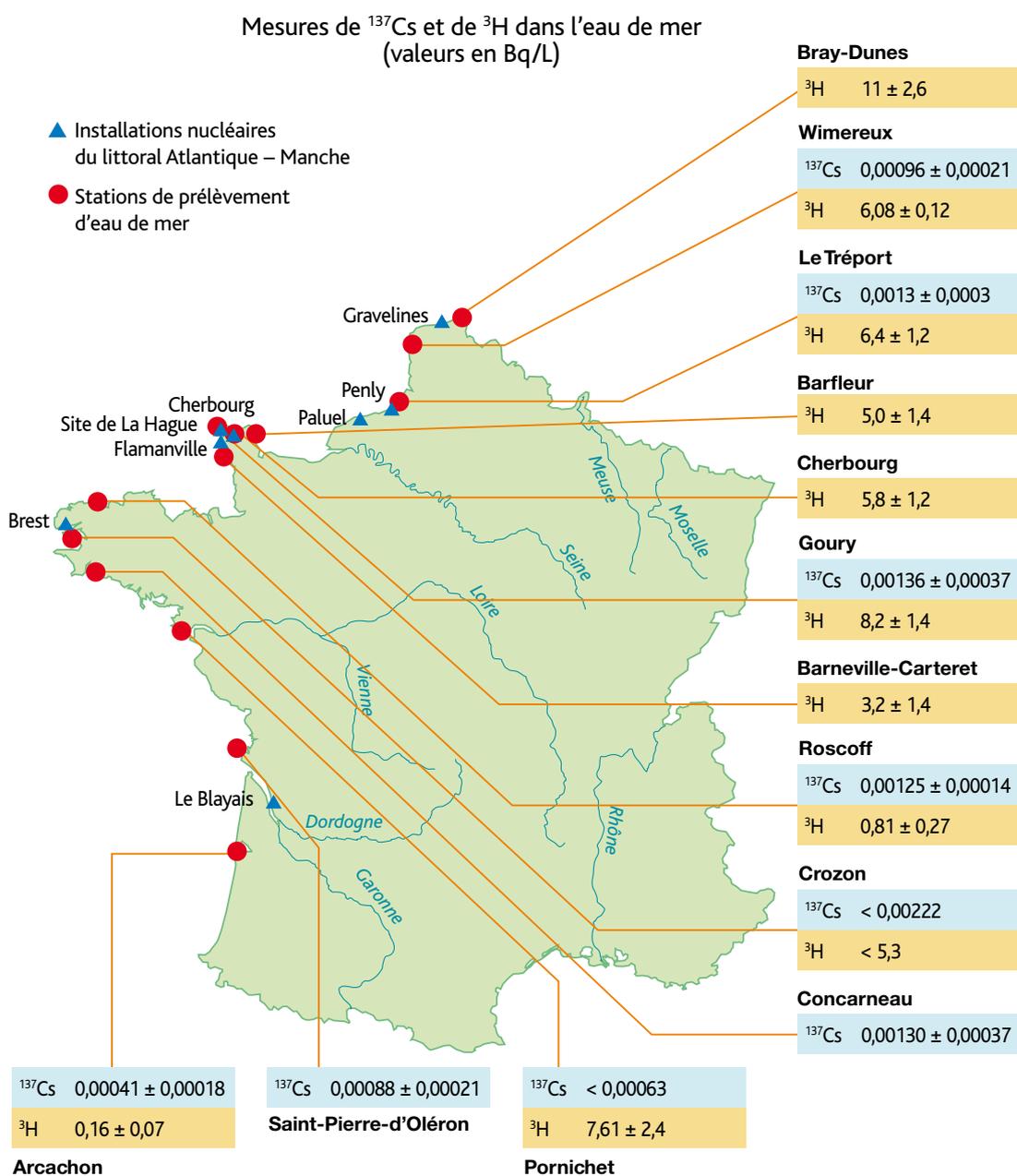


FIGURE III.36 Activités en ^3H et ^{137}Cs mesurées en 2009 dans l'eau de mer prélevée sur le littoral.

Sédiments

Le potassium 40 constitue le principal radionucléide naturel émetteur gamma, mesuré à des activités comprises entre 141 et 633 Bq/L. S'y ajoute la radioactivité artificielle, dont les principaux radionucléides artificiels mesurés dans l'environnement sont le césium 137, l'américium 241 ainsi que les isotopes 239 et 240 du plutonium.

Les concentrations en ^{137}Cs mesurées dans les prélèvements réalisés en 2009 (*Tableau III.2*) sont faibles (au maximum 2,6 Bq/kg sec), voire inférieures aux limites de détection (Pornichet, Arcachon). Les variabilités observées ne permettent pas de mettre en évidence une influence des rejets actuels des installations. Cette variabilité est principalement due à la diversité de texture des matrices prélevées (sable à Arcachon, vase à Oléron).

La cinétique de fixation du césium sur les matières en suspension et les sédiments, tout comme les quantités fixées, ne sont pas directement affectées par les variations du pH ou de l'oxygène dissous mais sont fonction de la nature minéralogique et de la taille des particules.

Le césium, dont le mécanisme essentiel de sorption est l'échange d'ions, interagit principalement avec les minéraux argileux, en particulier l'illite, sans exclure les particules les plus fines, qui présentent des surfaces d'interaction importantes. C'est le cas en particulier des carbonates et des oxy/hydroxydes.

Le ^{241}Am n'a pas été détecté en 2009 dans les prélèvements réalisés au niveau des stations de référence. Sa présence, révélée à Roscoff en Atlantique et Mers-les-Bains en Manche (*Tableau III.2*), peut être imputable aux rejets d'effluents liquides passés et actuels.

Les activités en $^{239,240}\text{Pu}$ dans les sédiments marins atteignent 0,37 Bq/kg sec à Roscoff et 0,124 Bq/kg sec à Mers-les-Bains. Les activités de ces transuraniens sont situées dans les ordres de grandeur observés pour les sédiments prélevés en dehors de l'influence directe d'installations nucléaires.

Dans le milieu marin, le plutonium provient des retombées des essais nucléaires atmosphériques et des rejets des installations. Actuellement, les rejets les plus significatifs proviennent des usines de retraitement. La diminution progressive des quantités rejetées induit, dans le milieu naturel, des concentrations en diminution et inférieures aux concentrations d'actinides d'origine naturelle comme l'actinium 228. Comme pour le césium, les concentrations en plutonium dans les sédiments dépendent de la surface spécifique, donc de l'abondance et de la nature de la fraction la plus fine, souvent riche en minéraux argileux. Dans un site donné, elles peuvent varier d'au moins un ordre de grandeur entre des sédiments sableux et des sédiments vaseux.

TABLEAU III.2 Activités en Bq/kg sec mesurées en 2009 dans les sédiments collectés sur le littoral.

| | Station | Roscoff | Honfleur | Mers-les-Bains | Pornichet | | Oléron | Arcachon |
|-----------|-----------------------|-------------|-------------|----------------|-----------|------------|------------|-------------|
| | Nature | Sédiment | Sédiment | Sédiment | Sable | Sédiment | Sédiment | Sédiment |
| Sédiments | ^{40}K | 633 ± 30 | 198 ± 8 | 301 ± 15 | 178 ± 16 | 254 ± 23 | 467 ± 31 | 141 ± 9 |
| | ^{60}Co | < 0,39 | < 0,23 | 1,71 ± 0,16 | < 0,17 | < 0,25 | < 0,28 | < 0,21 |
| | ^{106}Ru | < 3,22 | < 1,80 | < 2,58 | < 1,5 | nm | < 2,43 | < 2,29 |
| | ^{137}Cs | 1,01 ± 0,08 | 0,82 ± 0,06 | 2,52 ± 0,18 | < 0,15 | < 0,33 | 2,6 | < 0,19 |
| | ^{228}Ac | 31,4 ± 1,9 | 5,20 ± 0,37 | 11,40 ± 0,89 | 5,4 ± 0,8 | 14,7 ± 1,7 | 18,7 ± 1,5 | 5,30 ± 0,54 |
| | ^{241}Am | 0,13 ± 0,08 | nm | 2,37 ± 0,76 | nm | nm | nm | nm |
| | ^{238}Pu | < 0,12 | nm | nm | nm | nm | nm | nm |
| | $^{239+240}\text{Pu}$ | 0,37 ± 0,13 | nm | 0,124 ± 0,076 | nm | nm | nm | nm |

nm : non mesuré

Faune et flore marines

Algues

Comme pour les sédiments, la radioactivité mesurée dans les algues prélevées sur le littoral est représentée quasi-exclusivement par le potassium 40 (entre 59 et 312 Bq/kg frais) et, selon les stations, par quelques traces (au maximum 0,17 Bq/kg frais) de radionucléides d'origine artificielle comme le cobalt 60, l'iode 129, le césium 137, l'américium 241 et les isotopes du plutonium.

Bien que sa concentration ait diminué de plus d'un facteur 100 en vingt ans dans les rejets des installations nucléaires, le cobalt 60 est, avec le césium 137, l'un des rares radionucléides artificiels émetteurs gamma pouvant être détecté dans le milieu marin aujourd'hui, à l'ouest du Cotentin (jusqu'à $0,17 \pm 0,06$ Bq/kg frais). La présence de ce radionucléide s'explique par les rejets des installations de retraitement et de production d'électricité. Dans l'Atlantique, les activités en ^{60}Co sont inférieures aux limites de détection.

Le marquage des algues par les rejets des usines de retraitement de La Hague et de Sellafield se retrouve également dans les activités mesurées en iode 129 : alors qu'elles sont inférieures à 0,42 Bq/kg frais dans les algues prélevées à l'ouest de Roscoff, les activités mesurées d'Honfleur à Wimereux augmentent jusqu'à 1,49 Bq/kg frais.

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 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 (0,11 Bq/kg frais) et la station de Wimereux (0,12 Bq/kg frais).

La légère augmentation des activités en américium 241 de $< 0,001$ Bq/kg frais dans l'Atlantique à $0,006$ Bq/kg frais dans la mer du Nord, est attribuable à un marquage par les rejets des usines de retraitement de La Hague et Sellafield. La même observation est faite pour le plutonium 238. Les concentrations de ces deux radionucléides ont diminué depuis plusieurs années, en relation avec la baisse des activités rejetées par ces installations. Par contre, les variations des activités en plutonium 239+240 sur l'ensemble du littoral de l'Atlantique à la mer du Nord, comprises entre 0,006 et 0,010 Bq/kg, ne permettent pas de mettre en évidence une influence de ces installations.

Le marquage des algues par les rejets des installations nucléaires installées sur le littoral se retrouve également dans les niveaux mesurés d'activités en carbone 14 : de 240,10 Bq/kg C à Oléron, l'activité atteint 291,08 Bq/kg C à Wimereux. Les quelques analyses de tritium lié indiquent la même tendance : 0,29 Bq/kg frais à Oléron et 2,06 Bq/kg frais à Honfleur.

Les activités des autres radionucléides sont restées inférieures aux limites de détection.

TABLEAU III.3 Activités en (Bq/kg frais)* mesurées dans les algues prélevées en 2009 sur le littoral Atlantique – Manche – Mer du Nord.

| | | Oléron | Pornichet | Concarneau | Roscoff | Honfleur | Wimereux |
|------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | Fucus V | Fucus V | Fucus S | Fucus S | Fucus V | Fucus S |
| Algues | ^{40}K | 125 ± 13 | 59 ± 7 | 312 ± 19 | 273 ± 19 | 175 ± 15 | 262 ± 18 |
| | ^{60}Co | < 0,06 | < 0,05 | < 0,10 | < 0,45 | 0,07 ± 0,02 | 0,17 ± 0,06 |
| | ^{106}Ru | < 0,45 | < 0,45 | < 0,96 | < 0,62 | < 0,54 | < 0,63 |
| | ^{129}I | < 0,20 | < 0,24 | < 0,42 | < 0,37 | 0,62 ± 0,15 | 1,49 ± 0,18 |
| | ^{137}Cs | 0,11 ± 0,05 | 0,07 ± 0,03 | 0,13 ± 0,04 | 0,11 ± 0,04 | < 0,11 | 0,12 ± 0,04 |
| | Autres émetteurs gamma (^{54}Mn , ^{58}Co , ^{124}Sb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{134}Cs ...) | < 0,10 | < 0,11 | < 0,15 | < 0,12 | < 0,10 | < 0,11 |
| | ^{90}Sr | < 0,10 | nm | < 0,15 | < 0,10 | < 0,10 | < 0,11 |
| | ^{241}Am | < 0,004 | < 0,003 | < 0,001 | < 0,004 | 0,006 ± 0,001 | 0,005 ± 0,001 |
| | ^{238}Pu | < 0,002 | < 0,002 | < 0,003 | < 0,003 | 0,002 ± 0,001 | 0,004 ± 0,001 |
| | $^{239+240}\text{Pu}$ | 0,007 ± 0,002 | 0,009 ± 0,002 | 0,006 ± 0,001 | 0,008 ± 0,001 | 0,006 ± 0,001 | 0,010 ± 0,002 |
| | ^{14}C (Bq/kg C) | 240,10 ± 0,92 | 243,50 ± 1,03 | 240,30 ± 1,30 | 243,30 ± 1,30 | 246,30 ± 0,75 | 291,08 ± 1,03 |
| | ^3H libre (Bq/L) | 4,55 ± 1,61 | < 4,6 | < 4,5 | < 4,5 | 4,2 ± 1,2 | < 4,8 |
| ^3H lié | 0,29 ± 0,07 | 0,77 ± 0,20 | nm | nm | 2,06 ± 0,36 | nm | |

* Sauf indication contraire nm : non mesuré

Mollusques

Les radionucléides mesurés dans les mollusques sont les mêmes que ceux observés dans les algues, en dehors du cobalt 60 dont l'activité est restée inférieure aux limites de détection.

L'activité majoritaire, celle du potassium 40, oscille entre 36 ± 17 et 79 ± 10 Bq/kg frais. Des traces de césium 137 sont mesurées dans les moules de Concarneau, du Tréport et de Wimereux, à mettre en relation directe avec le césium 137 présent dans l'eau de mer.

Comme pour les algues, de l'américium 241 et du plutonium 238 sont décelés à l'est du site de La Hague (Tréport). Du plutonium 239+240, issu des retombées atmosphériques des essais aériens passés, est présent à l'état de traces dans la quasi-totalité des prélèvements analysés.



FIGURE III.37 Préparation de coquilles Saint-Jacques en vue de leur analyse radiologique.

TABLEAU III.4 Activités en (Bq/kg frais)* mesurées dans les mollusques prélevés en 2009 sur le littoral Atlantique – Manche – Mer du Nord.

| | | Concarneau | Le Tréport | | Wimereux | Oléron | | Arcachon |
|-----------------------|---|-------------|------------------------|---------------|---------------|-----------------|---------|-----------------|
| | | Moules | Coquille Saint-Jacques | Moules | Moules | Huîtres | Moules | Huîtres |
| Mollusques | ⁴⁰ K | 58 ± 10 | 79 ± 10 | 45 ± 12 | 71 ± 20 | 44 ± 21 | 36 ± 17 | 50 ± 35 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,04 | < 0,12 | < 0,06 | < 0,08 | < 0,06 | < 0,03 | < 0,40 |
| | ¹⁰⁶ Ru | < 0,30 | < 0,96 | < 0,59 | < 0,72 | < 0,50 | < 0,23 | nm |
| | ¹²⁹ I | < 0,24 | nm | nm | < 0,50 | < 0,22 | nm | < 1,31 |
| | ¹³⁷ Cs | 0,07 ± 0,03 | < 0,12 | 0,07 ± 0,05 | 0,05 ± 0,03 | < 0,05 | < 0,02 | < 0,25 |
| | Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ¹²⁴ Sb, ^{110m} Ag, ¹³⁴ Cs...) | < 0,08 | < 0,28 | < 0,14 | < 0,06 | < 0,14 | < 0,06 | < 1,31 |
| | ²⁴¹ Am | < 0,003 | 0,014 ± 0,003 | 0,005 ± 0,002 | 0,004 ± 0,001 | < 0,004 | < 0,002 | 0,003 ± 0,002 |
| | ²³⁸ Pu | < 0,002 | 0,007 ± 0,002 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,002 | < 0,0018 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | < 0,002 | 0,019 ± 0,004 | 0,002 ± 0,001 | 0,003 ± 0,001 | 0,0014 ± 0,0006 | < 0,002 | 0,0030 ± 0,0014 |
| | ¹⁴ C (Bq/kg C) | nm | nm | nm | nm | nm | nm | 244,5 ± 1,3 |
| ³ H (Bq/L) | nm | nm | nm | nm | < 4,50 | nm | < 4,50 | |

* Sauf indication contraire
nm : non mesuré

Poissons et crustacés

La radioactivité mesurée dans les crustacés et poissons est dominée par le potassium 40, dont la concentration est de l'ordre de 100 Bq/kg frais. En dehors de quelques traces de césium 137 mesurées dans les raies de Roscoff et les poissons du Tréport, les activités des autres radio-nucléides sont inférieures aux limites de détection.

L'absence de plutonium et d'américium s'explique par des potentialités de fixation plus faibles chez les organismes supérieurs (poissons) que chez les organismes inférieurs (algues).

TABLEAU III.5 Activités en (Bq/kg frais)* mesurées dans les poissons et crustacés prélevés en 2009 sur le littoral Atlantique – Manche – Mer du Nord.

| | | Roscoff | Le Tréport | Concarneau | Oléron | Oléron | Roscoff | Concarneau |
|-----------------------|--|-------------|-------------|------------|---------|----------|------------|------------|
| | | Raie | Poisson | Poisson | Poisson | Étrille | Tourteaux | Tourteaux |
| Poissons et crustacés | ⁴⁰ K | 80,4 ± 9,5 | 89 ± 26 | 118 ± 16 | 98 ± 13 | 104 ± 13 | 76,1 ± 8,0 | 105 ± 12 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,11 | < 0,05 | nm | nm | nm | < 0,16 | nm |
| | ¹⁰⁶ Ru | < 1,03 | nm | < 1,10 | < 1,15 | < 1,20 | < 1,27 | < 2,63 |
| | ¹²⁹ I | < 0,26 | nm | nm | < 0,30 | nm | nm | nm |
| | ¹³⁷ Cs | 0,19 ± 0,11 | 0,13 ± 0,07 | < 0,12 | < 0,14 | < 0,14 | < 0,15 | < 0,25 |
| | Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ¹²⁴ Sb, ^{110m} Ag, ¹³⁴ Cs...) | < 0,30 | < 0,15 | < 0,44 | < 0,48 | < 0,45 | < 0,41 | < 1,79 |
| | ²⁴¹ Am | < 0,003 | nm | nm | nm | nm | < 0,004 | nm |
| | ²³⁸ Pu | < 0,002 | < 0,007 | nm | nm | nm | < 0,003 | nm |
| | ²³⁸⁺²⁴⁰ Pu | < 0,002 | < 0,007 | nm | nm | nm | < 0,003 | nm |
| | ³ H libre (Bq/L) | < 4,5 | nm | < 4,5 | < 0,13 | < 0,14 | nm | nm |

* Sauf indication contraire
nm : non mesuré

LE LITTORAL MÉDITERRANÉEN

Le suivi du milieu marin en Méditerranée française, qui s'est poursuivi en 2009, est mis en œuvre à l'aide de prélèvements bimestriels de bio-indicateurs : moules (huit stations) et poissons (quatre stations). La répartition des stations permet une couverture géographique complète de la côte méditerranéenne française. Les moules ont été sélectionnées comme bio-indicateurs de choix par leur capacité à accumuler les contaminants présents dans les eaux côtières et les poissons pour leur niveau trophique plus élevé en liaison avec le risque de bio-amplification.

Les résultats 2009 mettent en évidence les points suivants :

- les niveaux de radionucléides artificiels en zone côtière restent très faibles, souvent avec des activités proches de la limite de détection des meilleures techniques analytiques. Ainsi, seul le ¹³⁷Cs est régulièrement détecté par spectrométrie gamma dans les échantillons avec des valeurs inférieures à 0,5 Bq/kg cendres (soit 0,02 Bq.kg⁻¹ de poids frais) pour les moules et inférieures à 2,0 Bq/kg cendres (soit 0,1 Bq.kg⁻¹ de poids frais) pour les poissons (Figures III.38 et III.39).

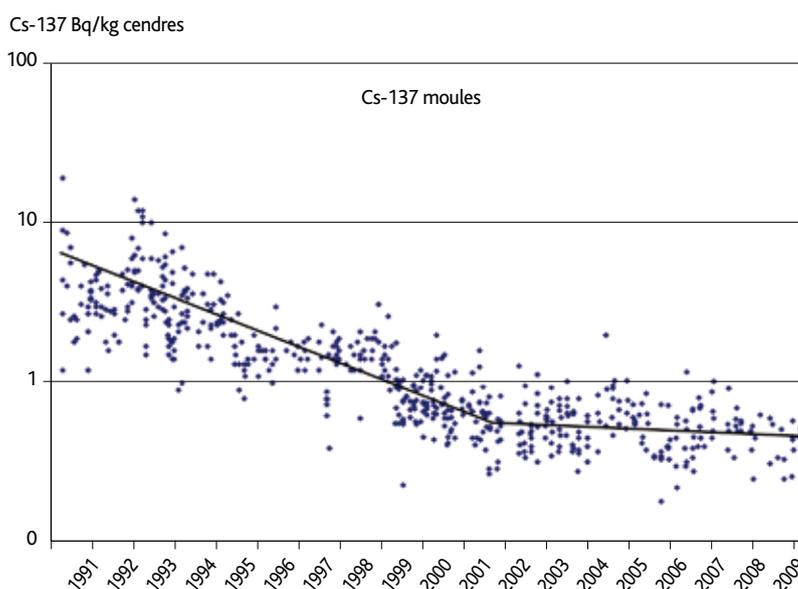


FIGURE III.38 Évolution de l'activité du ¹³⁷Cs dans les moules de 1992 à 2009 du littoral méditerranéen.

Cs-137 Bq/kg cendres

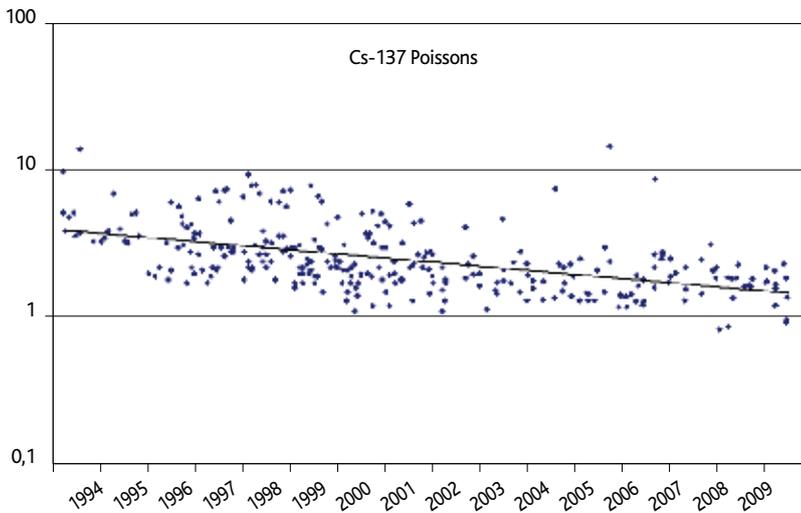


FIGURE III.39 Évolution de l'activité du ^{137}Cs dans les poissons de 1994 à 2009.

L'évolution des concentrations dans les moules sur les dernières années montre une stabilisation des niveaux, après une forte diminution au cours de la décennie 1990. Cette stabilisation traduit un équilibre entre les apports au milieu côtier, la bio-accumulation dans les organismes, et les processus sédimentaires (stockage, remobilisation partielle). Chez les poissons, cette diminution est moins marquée, et les activités du ^{137}Cs s'établissent désormais à des niveaux trois à quatre fois supérieurs à ceux mesurés dans les moules. Cette observation est à mettre en relation avec des phénomènes de rétention active du césium dans leurs muscles, comme analogue chimique du potassium.

Le ^{60}Co , issu des rejets des installations nucléaires, est occasionnellement détecté, à des niveaux très faibles (0,5 Bq/kg cendres soit 0,02 Bq/kg frais) dans les échantillons de moules prélevés à l'ouest du débouché du Rhône, traduisant l'impact des apports du fleuve sur cette portion du littoral.

En raison de l'importance relative croissante des rejets de ^3H et de ^{14}C par les installations nucléaires, des mesures de ces deux radionucléides ont été réalisées ponctuellement sur les moules et les poissons pour toutes les stations. Pour le ^3H , les niveaux dans les organismes sont très faibles et inférieurs à 1 Bq/kg sec sauf pour les stations situées près de l'embouchure du Rhône et à Toulon, traduisant un léger impact local des rejets de ^3H . Pour le ^{14}C , la distribution des niveaux est très homogène avec une valeur moyenne de 235 Bq/kg de C.

En 2009, l'IRSN a poursuivi sa participation au programme intitulé « RINBIO », soutenu par l'Agence de l'eau, coordonné par l'Ifremer et qui a pour objectif la fourniture d'une image précise et complète de la contamination en zone côtière. Ce programme est réalisé par l'implantation de moules dans des mouillages de sub-surface à partir d'un lot unique, bien calibré, pendant trois mois (avril à juin). Cette technique, désormais bien maîtrisée, permet une multiplication des points de mesures par rapport à la récolte de populations naturelles et également une comparaison spatiale des données, plus fiable par l'homogénéité des échantillons et de leurs conditions d'exposition.

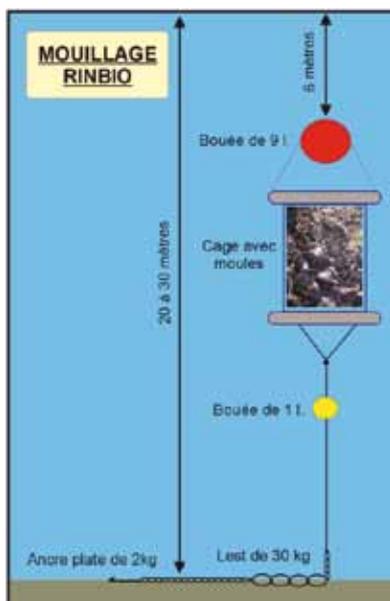


FIGURE III.40 Schéma des mouillages RINBIO pour les moules transplantées et récupération en plongée.

Les résultats pour la période considérée (avril à juin 2009) montrent des activités en ^{137}Cs cohérentes avec les niveaux enregistrés sur des moules naturelles. La distribution est plutôt homogène avec un léger impact des apports du Rhône pour les stations situées à l'ouest de l'embouchure du fleuve.

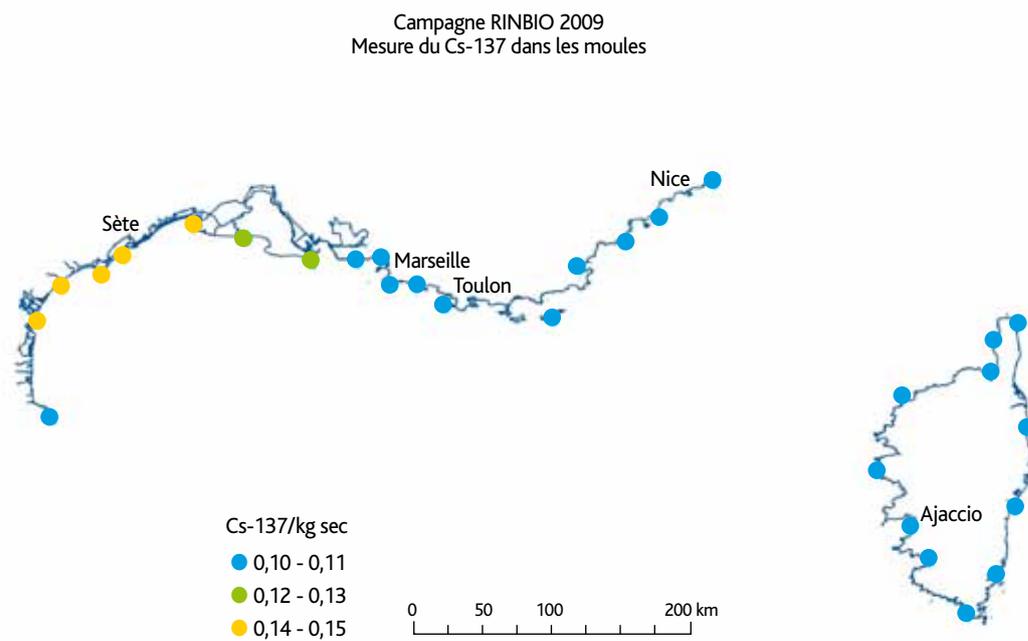


FIGURE III.41 Distribution du ^{137}Cs dans les moules prélevées en juin 2009.

III.4 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 2009*) en raison d'un historique particulier lié à la période des essais nucléaires qui se sont déroulés sur deux atolls français du Pacifique (Mururoa 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 vise à couvrir à moyen terme ces territoires uniquement par des moyens de télémesure ainsi que par des prélèvements de bio-indicateurs, hors événement particulier. Ce fut le cas en 2009 lorsqu'une étude a été menée en Guyane sur les productions agricoles suite à la découverte d'une anomalie radiologique dans les eaux de distribution (*voir Focus en page 64*).

Comme toute région de métropole, ces territoires feront aussi l'objet de constats radiologiques périodiques. L'Institut a l'intention de débiter les études spécifiques à La Réunion et en Nouvelle-Calédonie en 2011.

TÉLÉRAY

La sonde installée à Saint-Pierre-et-Miquelon n'a enregistré en 2009 aucune élévation anormale de la radioactivité (*Figure III.42*). Le débit de dose moyen se situe entre 80 et 100 nSv/h, une valeur comparable au débit de dose moyen enregistré en métropole.

LAIT ET BIO-INDICATEUR

Des analyses d'herbes ont été réalisées en 2009 en Guadeloupe et en Martinique. Du lait a été prélevé en Martinique, Guyane et à La Réunion (*Tableau III.7*).

Comme en métropole, la radioactivité mesurée en 2009 dans le lait et l'herbe est due essentiellement au potassium 40. Une activité artificielle en césium 137 a été mesurée dans le prélèvement d'herbes de Guadeloupe (1,82 Bq/kg sec). Des traces de césium 137 ont également été relevées dans le lait prélevé en Guyane (0,49 Bq/L). La présence de ce radionucléide, à l'état de traces, s'explique par les retombées atmosphériques anciennes des tirs aériens.

Aucune autre activité artificielle n'a été mesurée dans le lait ou les végétaux prélevés outre-mer.

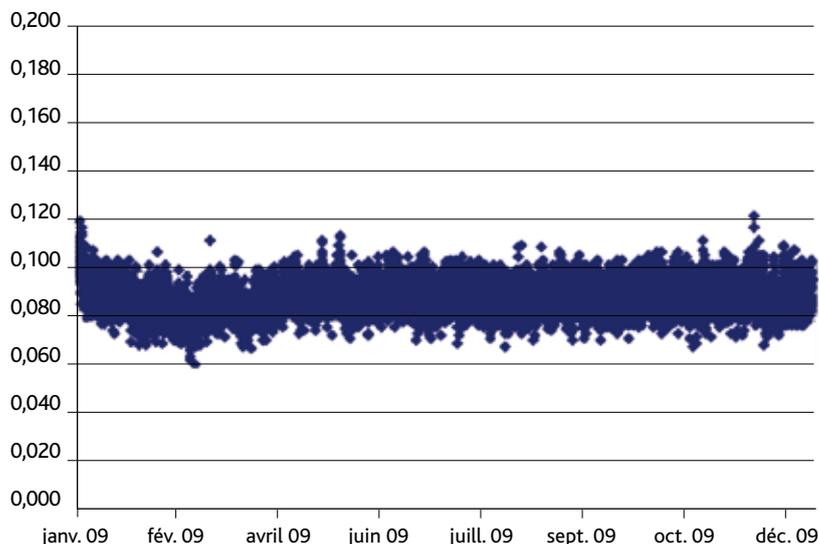


FIGURE III.42 Débit de dose enregistré en 2009 par la sonde Téléray de Saint-Pierre-et-Miquelon ($\mu\text{Sv/h}$).

TABLEAU III.6 Activités mesurées dans les échantillons d'herbes prélevés en 2009 dans les DROM-COM (Bq/kg sec).

| Radionucléide | Guadeloupe | Martinique |
|-------------------|-----------------|----------------------|
| ^{40}K | 720,00 | 1102,16 \pm 136,12 |
| ^{54}Mn | < 0,88 | < 4,07 |
| ^{106}Ru | < 7,47 | < 33,82 |
| ^{131}I | < 2,15 | < 9,36 |
| ^{134}Cs | < 0,79 | < 3,36 |
| ^{137}Cs | 1,82 \pm 0,82 | < 2,97 |
| ^{95}Zr | < 1,70 | < 7,49 |

TABLEAU III.7 Activités mesurées dans le lait prélevé en 2009 en outre-mer (Bq/L).

| Radionucléide | Martinique | Guyane | Réunion |
|-------------------|----------------|-----------------|----------------|
| ^{40}K | 46,0 \pm 4,6 | 44,5 \pm 5,3 | 46,0 \pm 4,7 |
| ^{131}I | < 0,37 | nm | nm |
| ^{134}Cs | < 0,16 | < 0,20 | < 0,18 |
| ^{137}Cs | < 0,21 | 0,49 \pm 0,12 | < 0,18 |
| ^{90}Sr | < 0,034 | < 0,16 | < 0,033 |

nm : non mesuré

SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ DES DENRÉES AGRICOLES DU VILLAGE DE JAVOUHEY (GUYANE) SUITE À UN DÉPASSEMENT DE PARAMÈTRES RADIOLOGIQUES LORS DU CONTRÔLE SANITAIRE DES EAUX DE DISTRIBUTION

Javouhey est un village d'environ 1 500 habitants situé au nord-est de la Guyane. Les habitants sont essentiellement des Hmong (réfugiés du Laos) qui, en majorité, pratiquent l'agriculture, faisant de ce bassin le principal producteur de fruits et de légumes de Guyane.

En septembre 2008, le Service de la protection des végétaux (SPV) de Guyane a sollicité l'appui de la Direction générale de l'alimentation en vue d'obtenir une expertise de l'IRSN suite à l'analyse d'échantillons d'eaux de distribution de ce village révélant la présence de niveaux de radioactivité naturelle élevés (potassium 40, radium 226 et 228 et thorium 232). Cette radioactivité naturelle trouve son origine dans la composition chimique du sous-sol guyanais dont les roches granitiques et sédimentaires peuvent renfermer des teneurs importantes en éléments radioactifs.

En 2009, l'IRSN a mené une expertise visant à estimer si ces teneurs mesurées dans l'eau utilisée pour l'irrigation des cultures sont de nature à induire un risque pour la santé du consommateur, via un transfert dans la chaîne alimentaire. Pour mener à bien cette évaluation, une campagne d'échantillonnage de fruits et de légumes cultivés dans la région de Javouhey (salade, concombre, aubergine, citron vert, papaye, ananas) a été réalisée par le SPV de Guyane sur le marché de Saint-Laurent-du-Maroni.



FIGURE III.43 Préparation des citrons verts avant séchage.

Les activités mesurées sur ces échantillons sont faibles. L'essentiel de la radioactivité mesurée est dû au potassium 40 d'origine tellurique (entre 52 et 104 Bq/kg frais). Les isotopes de l'uranium du thorium et du radium n'ont été détectés qu'à de faibles niveaux (valeur maximale de 0,6 Bq/kg frais dans les citrons verts). Ces niveaux ne sont pas de nature à augmenter de façon significative les doses normalement reçues du fait de l'alimentation et n'induisent donc pas la mise en œuvre de mesures particulières par rapport à la consommation et la commercialisation de ces productions agricoles.

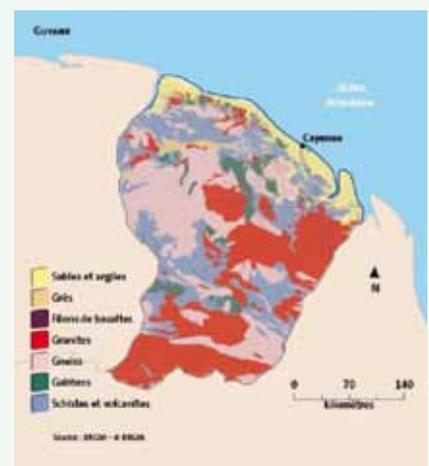


FIGURE III.44 Carte géologique de la Guyane.

III.5 LES CONSTATS RADIOLOGIQUES RÉGIONAUX

OBJECTIF ET PRINCIPE

L'un des axes d'évolution de la stratégie de surveillance radiologique du territoire national concerne la mise en place de constats radiologiques régionaux. L'objectif est d'établir, sur un territoire étendu (plusieurs départements), un référentiel actualisé des niveaux de radioactivité dans certains compartiments de l'environnement, en particulier dans les productions locales caractéristiques du territoire concerné. Ce référentiel doit rendre compte des hétérogénéités imputables au bruit de fond naturel ou rémanent ainsi qu'aux rejets, actuels ou témoins du passé, des installations nucléaires présentes sur ce territoire. En cas de rejet accidentel, ce référentiel servirait de base de comparaison et contribuerait à l'orientation du déploiement d'une surveillance renforcée post-accidentelle.

L'établissement des constats passe en premier lieu par l'examen des études radioécologiques antérieures et des données acquises dans le cadre de la surveillance permanente assurée par l'Institut. Ces connaissances sont ensuite complétées ou vérifiées par un nombre limité de prélèvements et d'analyses. Les constats prennent en compte la localisation des installations nucléaires, en distinguant les zones potentiellement influencées (ZI) par celles-ci, des zones proches ou éloignées de ces installations dites hors influence en situation normale (zones non influencées : ZNI), afin de mettre en évidence d'éventuels impacts des rejets. Ainsi, ces constats complètent la connaissance radiologique de l'environnement, en augmentant le territoire de surveillance (limité à la zone de 0 à 10 km sous les vents dominants), en diversifiant les matrices prélevées et en élargissant la liste des radionucléides recherchés.

De plus, pour établir cet état de référence, l'IRSN met en œuvre, dans la mesure du possible, les méthodes de prélèvement, de préparation et de métrologie les plus performantes.

LA STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

Pour le milieu terrestre, une sélection des denrées caractéristiques des productions régionales du territoire étudié est réalisée en présélectionnant les catégories de productions statistiquement les plus importantes en valeur économique et en quantité.

La stratégie d'échantillonnage de ces productions sous et hors influence est définie à partir :

- d'outils cartographiques (analyse de l'occupation des sols par système d'information géographique) ;
- des données statistiques publiées par les directions régionales de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (base de données statistiques AGRESTE) ;
- des études radioécologiques réalisées par l'IRSN en France ;
- des contacts locaux établis lors des campagnes de prélèvement, qui permettent d'ajuster des données théoriques (parfois obsolètes) à la réalité du terrain.

Les principaux paramètres utilisés pour établir la stratégie d'échantillonnage des productions végétales et animales sont le pourcentage de la valeur économique, la surface de production (SAU), la production, les OTEX (orientations technico-économiques), les cheptels et les quantités vendues (pour les produits de la pêche). La sélection des matrices tient également compte des données nécessaires pour réaliser un calcul de dose à partir des mesures de terrain : matrices représentatives des différentes voies d'exposition et de transferts de l'environnement vers l'homme.

À ces productions sont ajoutés des échantillons prélevés en routine, échantillons « repères », permettant des comparaisons avec des chroniques déjà disponibles, établies à proximité des installations nucléaires (lait, salades, feuilles d'arbres).

En complément des matrices alimentaires sélectionnées sur la base des paramètres agricoles, le plan d'échantillonnage établi dans l'environnement proche des installations concerne également les compartiments aquatique et atmosphérique.

En milieu aquatique, la stratégie d'échantillonnage vise essentiellement à étudier les données préexistantes ou acquises concomitamment et à les compléter ou les actualiser.



FIGURE III.45 Dispositif mobile de prélèvement des aérosols à grand débit (300 m³/h).

Pour le milieu atmosphérique, la connaissance des niveaux de radioactivité d'origine artificielle est relativement bien établie à l'échelle du territoire. Néanmoins, ce bruit de fond ne fait pas l'objet d'une caractérisation fine dans les zones à proximité des installations nucléaires, à partir des dispositifs de surveillance permanente. À ce titre, la stratégie de mesures complémentaires adoptée dans le cadre des constats radiologiques se focalise sur ces zones, en caractérisant ponctuellement autour de quelques installations nucléaires, les concentrations en radionucléides d'origine artificielle sous formes gazeuse ou d'aérosol. À cette occasion, des prélèvements de très grands volumes d'air sont réalisés.

Chaque constat comporte plusieurs campagnes de prélèvements (de l'ordre de 100 à 200 prélèvements) et nécessite, selon la complexité du territoire concerné, de trois à quatre ans entre son démarrage et sa restitution finale. Un constat devrait être actualisé selon une périodicité de l'ordre de cinq années environ. Les membres des CLI, autorités et administrations locales, sont conviés à participer à ces constats, notamment en apportant leurs connaissances de terrain lors de l'élaboration de la stratégie d'échantillonnage puis à des présentations des résultats et sont destinataires des rapports édités à l'occasion de chaque étude.

PRÉ-ÉTUDE « VAL DE LOIRE »

L'étude du Val de Loire constitue le prototype des constats régionaux dont les objectifs et le contenu se sont enrichis progressivement. Il s'agissait de tester l'intérêt et la faisabilité d'une telle étude régionale. Cette étude s'est déroulée de 2008 à 2010 sur un territoire allant de l'amont de Belleville-sur-Loire à l'aval de Chinon, en vue de déterminer les niveaux de radioactivité de cette région – principalement des denrées.

Pour les échantillons d'origine agricole, en plus des produits repères, ont été présélectionnées des productions dominantes à l'échelle du territoire étudié ou peu mesurées (vin, asperges, concombres, viande). Pour le milieu aquatique, des poissons et myriophylles ont été recherchés en zone influencée ou non influencée.

Les mesures acquises témoignent essentiellement du bruit de fond naturel et de la rémanence des dépôts anciens des retombées des tirs atmosphériques d'armes nucléaires (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, transuraniens, tritium et carbone 14) et de l'accident de Tchernobyl (¹³⁷Cs) sur l'ensemble du bassin.

Des valeurs détectables en cobalt 58 et 60 et argent ^{110m}, très faibles au demeurant, ont pu être observées sporadiquement en milieu aquatique, à l'aval immédiat des rejets. Aucune anomalie n'a été constatée sur l'ensemble de ces mesures par rapport aux connaissances déjà acquises relativement aux niveaux de radioactivité sur le territoire métropolitain.

Le rapport de cette pré-étude sera disponible en début 2011 et une présentation à destination des CLI du Val de Loire, de l'ASN et des exploitants locaux sera proposée à cette même période.

CONSTAT « VALLÉE DU RHÔNE »

Dimensions du constat

Le constat radiologique « Vallée du Rhône » a été entamé en 2009 et s'achèvera en 2012.

Dans le cadre de ce constat, le terme « Vallée du Rhône » désigne le territoire bordant le Rhône, de l'amont de Creys-Malville jusqu'en Camargue et comprend les communes limitrophes de part et d'autre du Rhône (Figure III.46). Des points particuliers supplémentaires, excentrés mais présentant un intérêt spécifique (productions emblématiques), peuvent aussi être pris en compte.

Ce territoire représente environ 550 000 hectares, dont une moitié est constituée d'espaces agricoles, près du quart de forêts et d'espaces naturels et plus de 12 % de zones artificialisées.

Sur ce territoire sont considérées, en tant que sources potentielles de radionucléides, les grandes installations nucléaires situées directement sur la zone d'étude : les quatre CNPE en activité (Bugey, Saint-Alban, Cruas et Tricastin), le réacteur de Creys-Malville (en démantèlement), les autres installations du complexe de Tricastin-Pierrelatte et celles de Marcoule. L'impact éventuel des rejets liquides dans l'Isère (usine FBFC de Romans-sur-Isère et centre CEA de Grenoble) est également pris en compte par un échantillonnage au niveau de la confluence Rhône-Isère.

En milieu terrestre, la zone potentiellement influencée (ZI) n'excède habituellement pas quelques kilomètres. Quelquefois, elle peut être plus grande, comme à Marcoule où l'influence des rejets atmosphériques peut dépasser ces quelques kilomètres du fait des quantités rejetées et de la rose des vents fortement orientée dans l'axe de la vallée. Les zones non influencées (ZNI) sont, quant à elles, volontairement délimitées à partir d'une distance très supérieure à celle prise en compte pour la zone potentiellement influencée, typiquement au-delà de 15 à 20 km de chacune des installations environ, dans des endroits qui ne font donc pas habituellement l'objet d'une surveillance régulière.

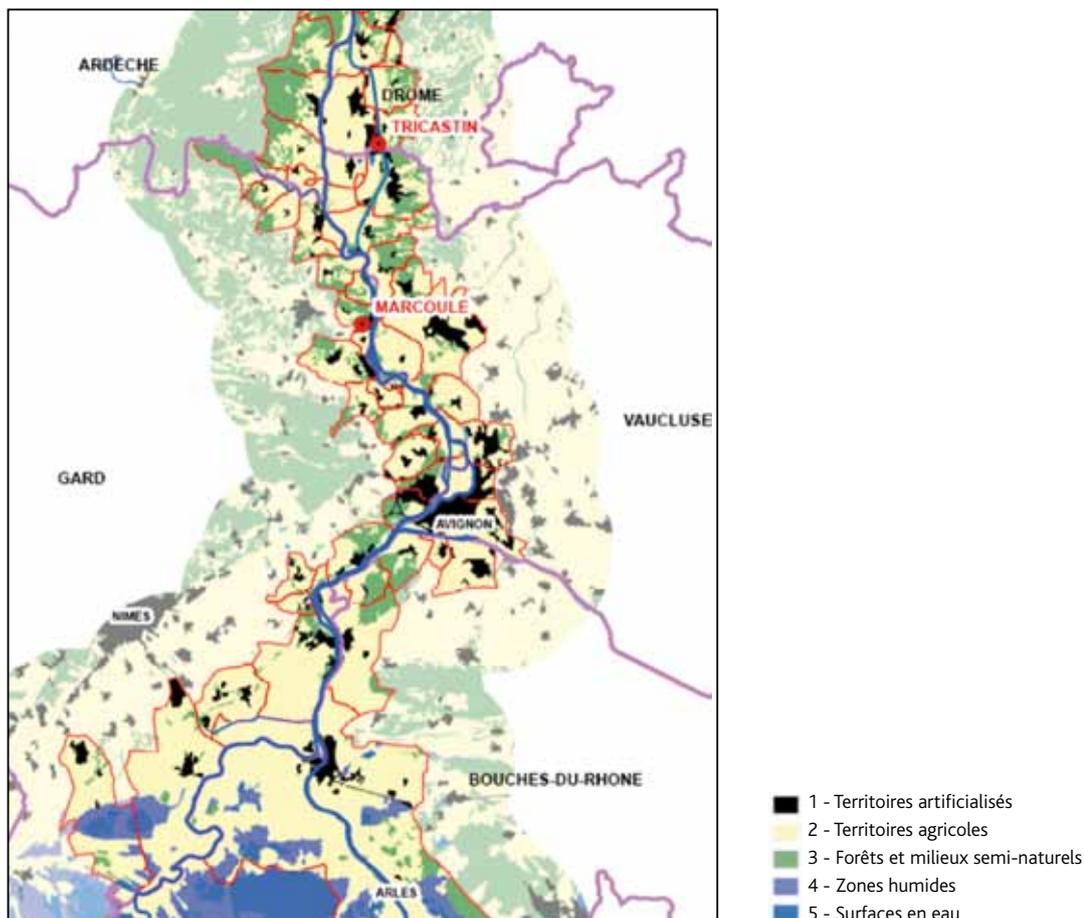


FIGURE III.46 Représentation de la partie sud étudiée en 2009 dans le cadre du constat « Vallée du Rhône ».

Pour le milieu aquatique, les zones potentiellement influencées sont celles situées en aval de chacune des installations. En ce qui concerne les zones non influencées, la succession d'installations le long du Rhône rend plus difficile leur délimitation. Les zones situées à l'amont du rejet des installations sont définies comme des zones non influencées mais on veillera à prélever des échantillons témoins en amont de l'ensemble des installations nucléaires du fleuve. Les rejets éventuels provenant de la Suisse sont suffisamment dilués par le lac Léman pour ne pas impacter le territoire français. Subsiste l'impact du tritium lié à la matière organique dans les sédiments rhodaniens, issu des rejets de l'industrie horlogère suisse et sur lequel une étude particulière est en cours de réalisation. Un volet annexe est réalisé sur l'impact en milieu aquatique des rejets liquides des services hospitaliers de radiothérapie ou de radiodiagnostic situés le long du fleuve.

Plan de prélèvement

Milieu terrestre

Le plan de prélèvement des échantillons comporte plusieurs catégories :

- des productions agricoles dominantes, en zones influencées ou non influencées, contribuant le plus à la production métropolitaine (en valeur et en superficie, statistiques AGRESTE 2006) : fruits de vergers, 40 % ; légumes frais, 25 % ; fromages de chèvre, 20 % ; vins, 14 % ; viande d'ovins, 11 % (Figure III.47), auxquelles ont été ajoutées des productions symboliquement importantes : huile d'olive, noix AOC... Les catégories agrégées, fruits et légumes, ont été détaillées afin d'aboutir à une liste de produits spécifiques selon la localisation géographique (exemple des fruits, Figure III.48).
- des échantillons du même type que ceux prélevés systématiquement lors de la surveillance régulière de l'IRSN (salades ou laits...) qui permettent une comparaison du territoire étudié avec les chroniques existantes ;
- quelques produits végétaux ou animaux caractéristiques des écosystèmes naturels : champignons, gibiers, baies sauvages... ;
- des indicateurs spécifiques de certains radionucléides, en particulier au voisinage de Marcoule : en raison de la rémanence probable de certains radionucléides spécifiques rejetés par le passé (exemple des transuraniens : plutonium, américium, recherchés dans les sols ou les mousses) ou bien dont l'importance des rejets actuels justifie un échantillonnage particulier (exemple du tritium atmosphérique dont on recherche l'incorporation dans les feuilles d'arbres).

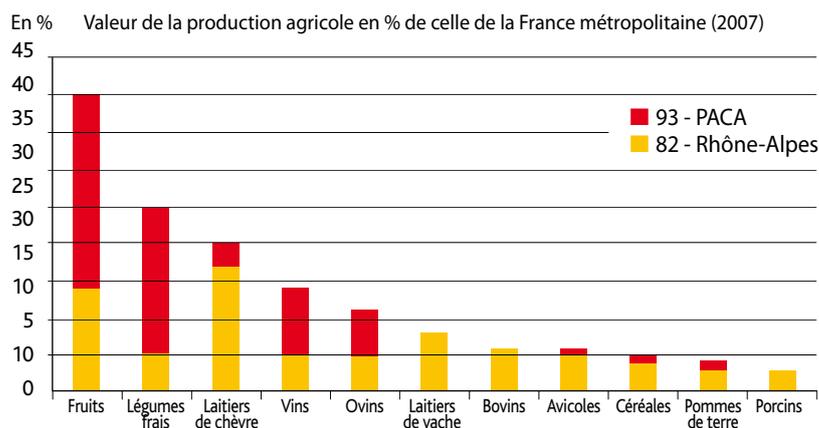


FIGURE III.47 Principales valeurs économiques d'intérêt pour le constat « Vallée du Rhône » en % de la production agricole de la France métropolitaine.

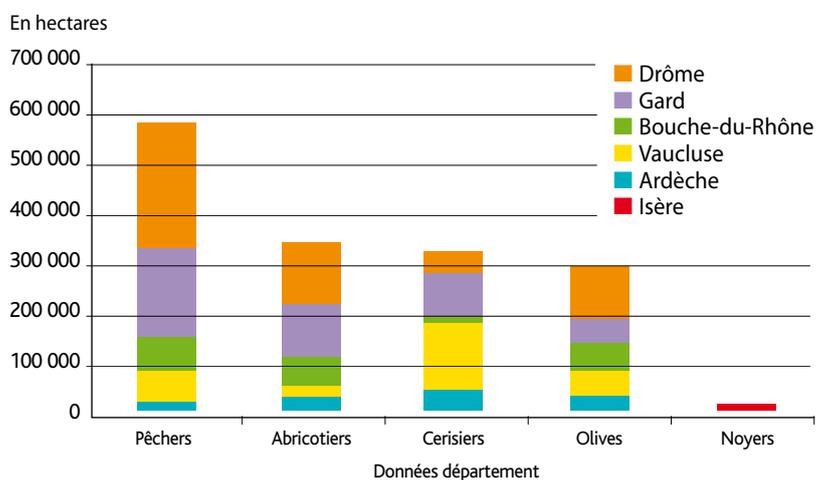


FIGURE III.48 Décomposition de la catégorie « fruits de vergers » en espèces fruitières au niveau départemental.

La liste des prélèvements et des analyses prévus est résumée au Tableau III.8. En dehors de la zone d'influence de Marcoule, les prélèvements sont répartis spatialement de façon à ce qu'au moins un type de produit soit prélevé sur chacune des cinq zones

potentiellement influencées par les autres installations : Tricastin, Cruas, Saint-Alban, Bugey, Creys-Malville et sur chacune des zones non influencées réparties le long de la vallée, entre les sites.

TABEAU III.8 Liste des échantillons et des analyses (milieu terrestre) réalisés dans le cadre du constat « Vallée du Rhône ».

a) Prélèvements et analyses spécifiques au voisinage de Marcoule

| Type d'échantillon | Nombre d'échantillons | Spectrométrie gamma | ⁹⁰ Sr | ³ H | ¹⁴ C | Spectrométrie alpha (Am, Pu) |
|--|-----------------------|---------------------|------------------|----------------|-----------------|------------------------------|
| Raisin, salade | 3 | 3 | 2 | 1 | - | 3 |
| Bio-indicateurs (mousses, thym...) | 4 | 4 | 4 | - | - | 4 |
| Profils de sols | 12 | 12 | 12 | - | - | 12 |
| Feuilles annuelles (peupliers) : transects | 14 | - | - | 14 | - | - |
| Total | 33 | 19 | 18 | 15 | 4 | 19 |

b) Autres prélèvements

| Type | Nature | Nombre d'échantillons | Spectrométrie gamma | ⁹⁰ Sr | ³ H | ¹⁴ C |
|----------------------|--|-----------------------|---------------------|------------------|----------------|-----------------|
| Indicateurs | Feuilles d'arbres | 10 | - | - | 10 | 10 |
| Vin | Vins ou raisins | 4 | 4 | - | - | - |
| Céréales | Blé, riz | 2 | 2 | - | - | - |
| Fruits | Poires, pommes, prunes ou raisin (nord de la vallée) Abricots, pêches, brugnon, cerises... (sud de la vallée) | 10 | 10 | - | - | - |
| Légumes | Salades (nord), tomates, poivrons, courgettes... (sud) | 10 | 10 | - | - | - |
| Productions animales | Viande (agneau ou volailles ou bœuf selon élevage local) ou œufs | 3 | 3 | - | - | - |
| Laits | Lait de vache (nord). Lait ou fromage de chèvre (sud) | 10 | 10 | 10 | - | - |
| Produits spécifiques | Huile d'olive, miel, ail, châtaignes, noix, thym, romarin... | 10 | 3 | - | - | - |
| Naturels | Gibiers et champignons (selon opportunités) | 3 | 3 | - | - | - |
| Divers | Sables de Camargue (radioactivité naturelle) | 3 | 3 | - | - | - |
| Total | | 65 | 48 | 10 | 10 | 10 |

Milieu aquatique

En termes de suivi, le Rhône fait l'objet d'une observation assez complète dans le cadre de la surveillance régulière de l'IRSN, qui dispose d'hydrocollecteurs permettant des prélèvements semi-automatisés d'eau et de matières en suspension en aval de chaque installation nucléaire. L'observatoire implanté à Arles (station SORA) vient compléter ce dispositif de surveillance en permettant des prélèvements de très grands volumes (voir Focus du Chapitre III.2). Étant donné l'importance de ce suivi, les prélèvements supplémentaires seront peu nombreux (Tableau III.9), en relation avec des zones ou des organismes moins bien caractérisées.

Ainsi, des prélèvements en zones dites « non influencées » seront réalisés à l'amont de chacune des installations. À ces prélèvements seront adjoints quelques points particuliers (par exemple, l'amont de Romans-sur-Isère) ainsi que des prélèvements d'eau et de matières en suspension des principaux affluents à proximité de leur confluence avec le Rhône. En zone influencée, des animaux filtreurs (bivalves), rarement échantillonnés, seront prélevés en aval des CNPE et de Marcoule.

CONSTAT « SUD-OUEST »

Dimension du constat

Le constat radiologique « Sud-Ouest » a été entamé en 2009 et s'achèvera en 2012.

Le périmètre d'étude de ce constat dans le sud-ouest de la France est présenté en Figure III.49. Dans ce périmètre, les « sources potentielles d'exposition radiologique » sont :

- les centrales nucléaires en exploitation de Golfech, Civaux et Le Blayais ;
- les zones uranifères et les zones sous influence des anciens sites miniers (principalement localisées dans le Limousin) ;
- les zones de rémanence liées aux retombées atmosphériques passées (la zone de relief de la chaîne des Pyrénées peut être considérée comme une zone potentielle de rémanence) ;
- les rejets liés aux activités nucléaires du secteur médical (via les stations d'épuration dans les cours d'eau).

Le périmètre retenu pour ce constat tient compte de ces sources d'exposition, à l'exception des anciens sites miniers qui requièrent une stratégie d'échantillonnage particulière justifiant de les examiner distinctement. Une surveillance spécifique des anciens sites miniers devrait être engagée en 2011 sous la forme de constats thématiques qui compléteront les données des constats radiologiques régionaux avec des mesures complémentaires sur les radionucléides d'origine naturelle (uranium, thorium...).

TABLEAU III.9 Prélèvements et analyses prévisionnels en zones potentiellement influencées ou non, en milieu aquatique dans le cadre du constat « Vallée du Rhône ».

| Échantillons | Spectro. gamma | Spectro. alpha | ⁹⁰ Sr | ³ H | ¹⁴ C | ¹²⁹ I | U isotopique |
|--------------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|-----------------|------------------|--------------|
| Sédiments ZI | 8 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| Végétaux ZI | 9 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Poissons ZI | 4 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| Bivalves ZI | 6 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | - |
| Eaux de baignade ZI | 2 | - | 2 | - | - | - | 2 |
| Sédiments ZNI | 2 | 1 | 1 | - | - | - | 1 |
| Végétaux ZNI | 2 | 1 | 1 | - | - | - | 1 |
| Poissons et bivalves ZNI | 2 | 1 | 1 | - | - | - | 1 |
| Eaux ZNI | 9 | - | - | - | - | - | 1 |
| MES ZNI | 7 | - | - | - | - | - | - |
| Total | 51 | 9 | 10 | 8 | 9 | 5 | 12 |

ZI : Zone influencée
 ZNI : Zone non influencée
 MES : Matière en suspension

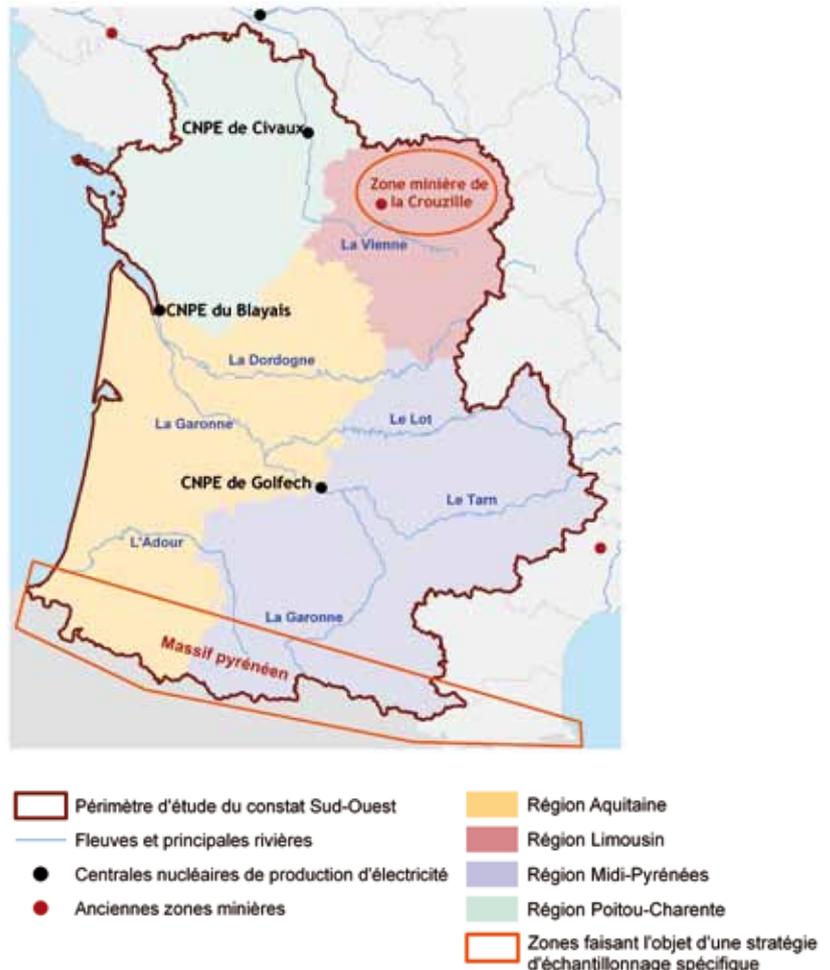


FIGURE III.49 Périmètre d'étude du constat « Sud-Ouest ».

Pour le constat « Sud-Ouest », les analyses d'uranium concernent l'étude du bassin versant de la Vienne, entre Limoges et la confluence de la Loire.

La Figure III.50 présente l'ensemble des prélèvements réalisés en 2009 et 2010 dans le compartiment terrestre et aquatique dans le cadre du constat « Sud-Ouest ». Cette figure ne restitue pas les prélèvements effectués, notamment sur la partie littorale, dans le cadre de la surveillance permanente du territoire réalisée par l'IRSN.

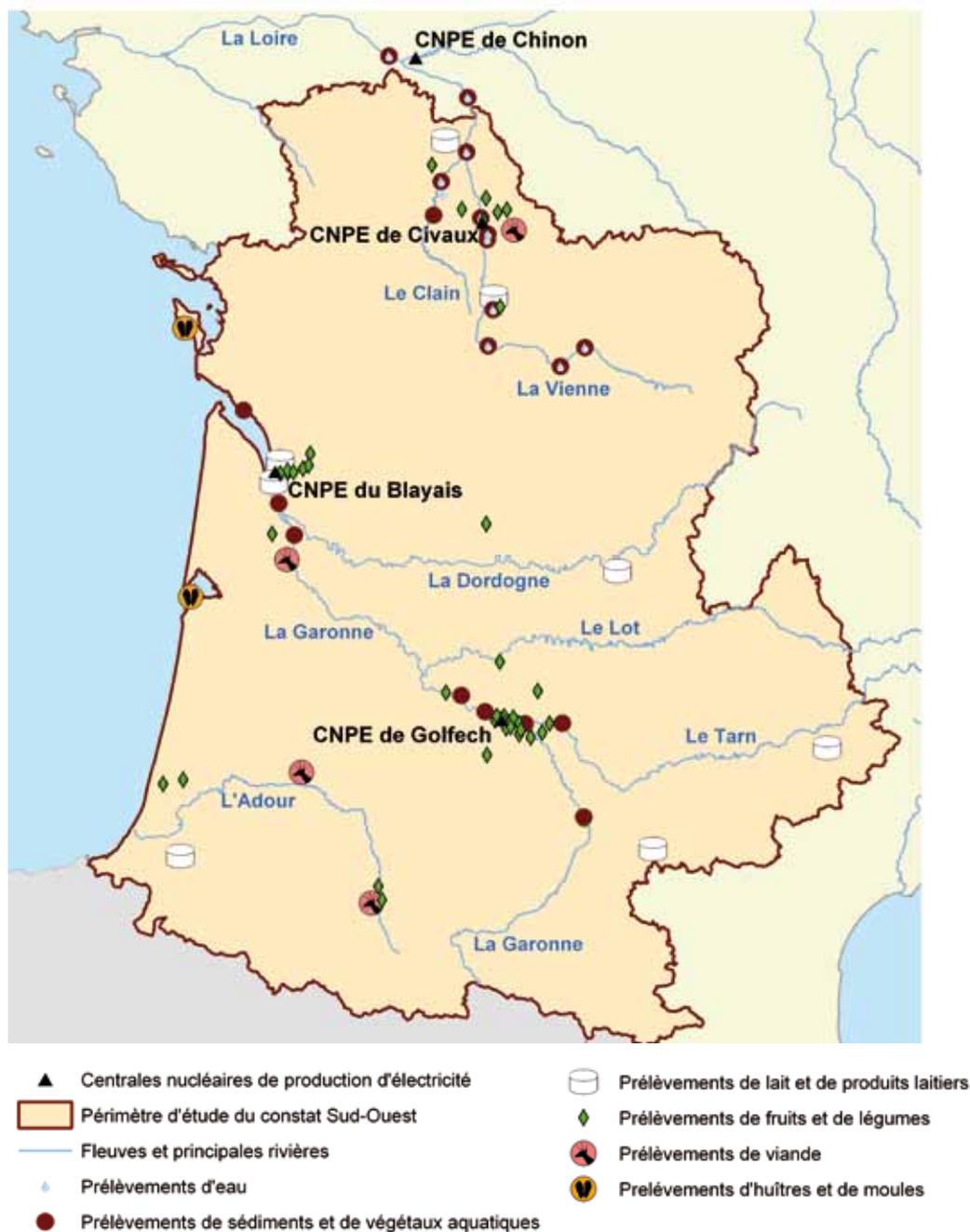


FIGURE III.50 Prélèvements spécifiquement réalisés en 2009 et 2010 dans le cadre du constat régional « Sud-Ouest ».

Plan de prélèvement

Milieu terrestre

Comme pour chaque constat, le suivi radiologique des productions agricoles constitue une part importante du programme d'échantillonnage. En effet, les productions agricoles de la région « grand Sud-Ouest » présentent un pourcentage économique important sur le plan national (Figure III.51). Cette région est également la première région productrice de fruits et légumes de France (en production).

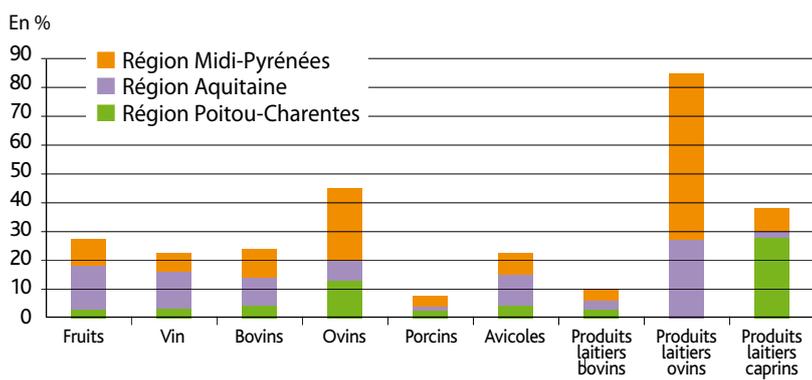


FIGURE III.51 Principales valeurs économiques d'intérêt pour le constat « Sud-Ouest » en % de la production agricole de la France métropolitaine (données AGRESTE 2006).

TABLEAU III.10 Prélèvements et analyses prévisionnels pour le compartiment terrestre dans le cadre du constat « Sud-Ouest ».

| Type d'échantillon | Nombre d'échantillons | Analyses prévues | | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|------------------------------|------------------|---|
| | | Spectrométrie gamma | ³ H | ¹⁴ C | Spectrométrie alpha (Am, Pu) | ⁹⁰ Sr | Autres analyses (U, Th, ²²⁶ Ra...) |
| Lait (ZI + ZNI) | 3 + 3 | 6 | 6 | - | - | 3 | - |
| Produits laitiers (fromages) ZNI et ZI | 5 | 5 | 5 | - | - | 5 | 5 |
| Salades (ZI + ZNI) | 3 + 2 | 5 | 5 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| Autres légumes (ZI + ZNI) | 5 + 3 | 8 | 8 | 8 | 8 | 3 | 3 |
| Fruits (ZI + ZNI) | 7 + 7 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Production vinicole ZI et ZNI (vin, raisin pour filière vinicole) | 12 | 12 | 12 | 3 | - | 9 | - |
| Viande de bovin et d'ovin avec l'appui de la DGAL | 3 | 3 | 3 | 3 | - | 3 | - |
| Champignons ZI et ZNI (en fonction des opportunités) | 4 | 4 | 4 | - | - | - | - |
| Indicateurs (feuilles d'arbres) ZNI et ZI | 12 | 12 | 12 | - | - | - | - |
| Spécialités régionales | 4 | 4 | 4 | 4 | - | 4 | 4 |
| Céréales | surveillance régulière des blés | - | - | - | - | - | - |

ZI : Zone influencée ZNI : Zone non influencée

La liste des prélèvements et des analyses programmés dans le cadre des prélèvements terrestres du constat « Sud-Ouest » est résumée dans le Tableau III.10. La majorité de ces prélèvements a été réalisée en 2009 et 2010. Les missions d'échantillonnage se termineront au printemps 2011. Selon les opportunités ou les aléas climatiques, cette liste est susceptible d'être légèrement modifiée.

Les prélèvements de feuilles d'arbre (feuilles de chêne), de salades, de lait, de légumes et de fruits ont été réalisés autour de chaque centrale nucléaire (Civaux, Golfech, Le Blayais) en zone influencée (*a minima* un prélèvement par site) et non influencée.

Conformément à la stratégie d'échantillonnage mise en place, les légumes et les fruits prélevés sont issus des principales productions régionales : fraise, pomme, melon, noisette, prune, raisin, pomme de terre, asperge, ail, carotte. Ce plan d'échantillonnage terrestre sera finalisé en 2010 avec des prélèvements de raisin, de vin, de viande (volailles), de champignons ainsi que de spécialités régionales.

Milieu aquatique

De la même manière que sur le Rhône, pour la surveillance des cours d'eau en aval des installations nucléaires intéressées par le constat radiologique du sud-ouest (Golfech, Le Blayais et Civaux), l'IRSN dispose d'hydrocollecteurs permettant des prélèvements semi-automatisés d'eau et de matières en suspension. Au cours de ce constat, les résultats de cette surveillance nucléaire sont complétés par des prélèvements d'eau, de sédiments et de végétaux aquatiques réalisés en amont (zone non influencée) et en aval (zone influencée) de chaque installation nucléaire. Par ailleurs, des prélèvements complémentaires dans la Vienne, le Clain et la Garonne sont effectués dans l'objectif d'étudier le marquage dû aux rejets liquides des services hospitaliers de radiothérapie ou de radiodiagnostic situés le long de ces cours d'eau. La liste des prélèvements et des analyses prévus dans le cadre des prélèvements terrestres du constat « Sud-Ouest » est résumée dans le Tableau III.11.



FIGURE III.52 Prélèvement de végétaux aquatiques (Jussie) dans la Vienne en aval de la centrale nucléaire de Civaux.

Enfin, les mesures réalisées dans le cadre de la surveillance chronique du littoral atlantique (prélèvements de sédiments, de poissons, de crustacés, d'algues et d'eau de mer) viennent également compléter la base de données pour l'établissement de ce référentiel radiologique du sud-ouest.

TABLEAU III.11 Prélèvements et analyses prévisionnels pour le compartiment aquatique continental dans le cadre du constat « Sud-Ouest ».

| Échantillons | Nombre de prélèvements | Spectro gamma | ³ H | ¹⁴ C | ⁹⁰ Sr | Thorium isotopique | Uranium isotopique | Am/Pu isotopique | Alpha / Bêta global |
|-------------------------|------------------------|---------------|----------------|-----------------|------------------|--------------------|--------------------|------------------|---------------------|
| Sédiments ZI | 6 | X | | | X | X | X | X | |
| Sédiments ZNI | 14 | X | | | X | X | X | X | |
| Végétaux aquatiques ZI | 6 | X | X | X | | | | | |
| Végétaux aquatiques ZNI | 14 | X | X | X | | | | | |
| Eaux ZI | 6 | X | X | | | | X | | X |
| Eaux ZNI | 9 | X | X | | | | X | | X |

ZI : Zone influencée
ZNI : Zone non influencée



IV

LES RÉSULTATS DE LA SURVEILLANCE DES SITES DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

- IV.1 La surveillance de l'environnement à proximité des sites nucléaires
- IV.2 La surveillance de l'environnement autour des anciens sites miniers
- IV.3 La surveillance des industries situées en amont dans le cycle du combustible
- IV.4 La surveillance des centres nucléaires de production d'électricité
- IV.5 La surveillance des industries situées en aval dans le cycle du combustible
- IV.6 La surveillance des centres de stockage des déchets



■ IV.1 LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT À PROXIMITÉ DES SITES NUCLÉAIRES

Jusqu'en 2001, date de fermeture de la dernière mine 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 :

- extraction de l'uranium des mines ;
- concentration et conversion des composés d'uranium ;
- enrichissement isotopique en uranium 235 ;
- fabrication et assemblage du combustible¹ ;
- utilisation dans les réacteurs des Centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) ;
- retraitement du combustible usé déchargé des réacteurs ;
- traitement et stockage des déchets issus ou non du retraitement.

Le cycle du combustible français est dit « fermé » ou « semi-ouvert » du fait des étapes de retraitement et de réutilisation d'une partie du combustible usé.

Tous les sites du cycle du combustible 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.

¹ - Le combustible peut être « moxé » (MOX), c'est-à-dire constitué d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium issu du retraitement.

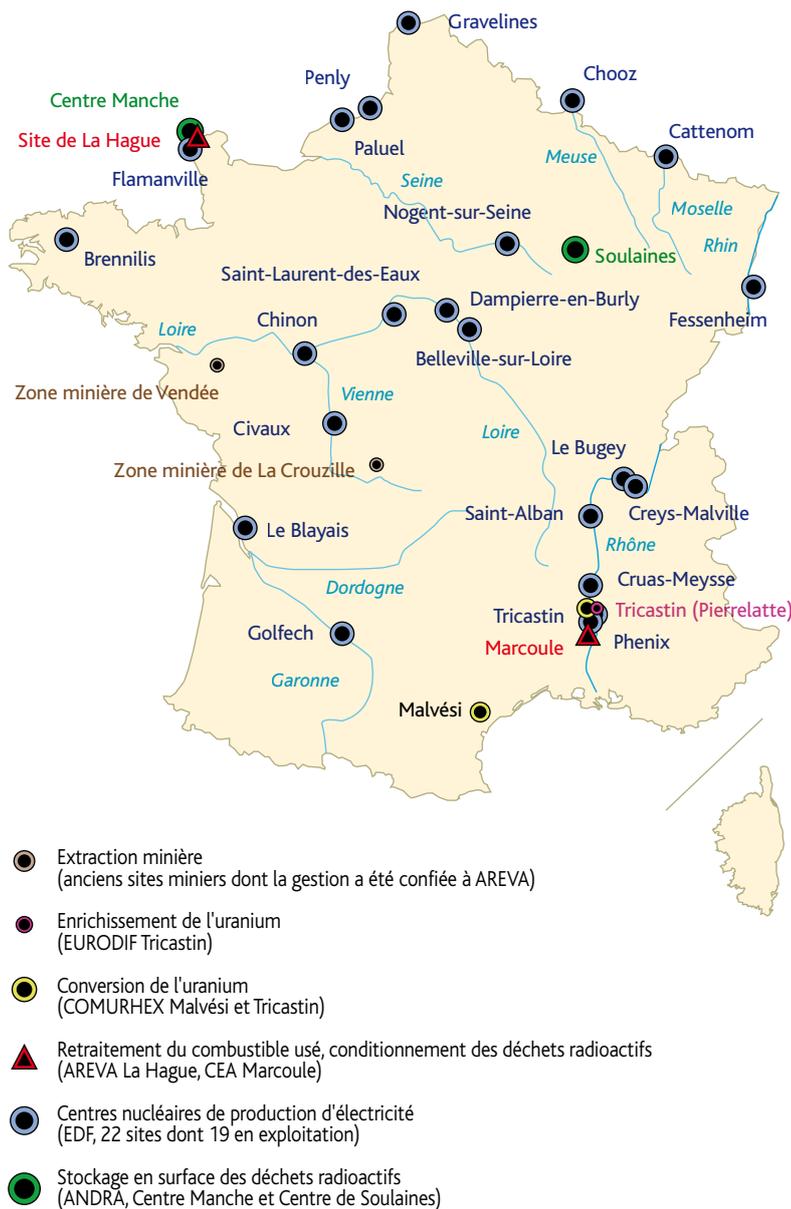


FIGURE IV.1 Implantation des sites du cycle du combustible français surveillés par l'IRSN en 2009.

L'IRSN effectue, indépendamment du programme de surveillance réglementaire imposé à l'exploitant, des mesures de surveillance dans l'environnement des sites indiqués sur la Figure IV.1.

Les plans de surveillance développés par l'IRSN 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 au Chapitre I.5.

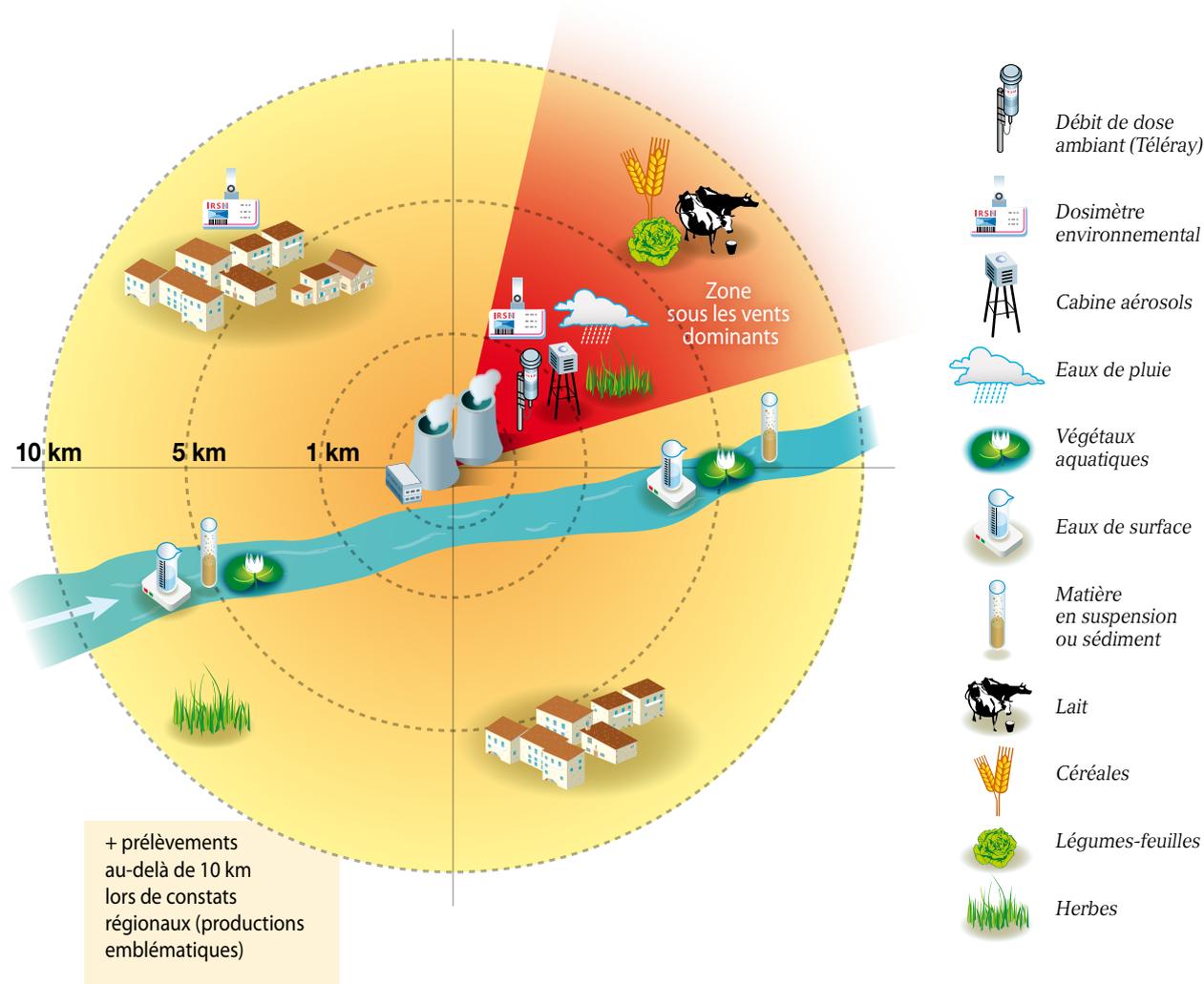
Le plan type de surveillance établi à proximité des installations surveillées comprend généralement :

- la mesure en continu dans l'air du rayonnement gamma ambiant par une sonde Téléray, complétée par une mesure intégrée de ce paramètre à partir du déploiement de quelques dosimètres thermoluminescents (DTL) ;
- le prélèvement d'aérosols, au niveau du sol, sous les vents dominants de l'installation surveillée. Un dispositif de piégeage du tritium complète la surveillance atmosphérique autour de quelques installations ;
- le prélèvement des eaux de pluie sous les vents dominants par un collecteur ;
- le prélèvement d'eaux de surface et de matières en suspension (MES) en amont et aval des rejets liquides de l'installation (généralement prélèvement semi-automatique par hydrocollecteur en aval de l'installation) ;
- le prélèvement de bio-indicateurs de radiocontamination essentiellement pour la surveillance du littoral marin (algues, mollusques) ;
- le prélèvement *a minima* de deux à trois productions françaises importantes, d'origine animale (le lait) ou végétale (légumes-feuilles et le blé) dans une exploitation agricole située sous les vents dominants.

Le déploiement de ces prélèvements est présenté à la Figure IV.2.

Ce plan type est complété, notamment lors de marquage avéré, par des prélèvements de sols, de végétaux aquatiques ou terrestres et d'autres produits de la chaîne alimentaire, réalisés soit dans le cadre d'une surveillance régulière (environnement des sites de Marcoule ou de La Hague par exemple), soit dans le cadre d'études spécifiques, notamment lors de constats radiologiques.

Les résultats des analyses réalisées sur les échantillons prélevés en 2009 dans l'environnement des installations sont présentés selon le déroulement du cycle du combustible.



© Chromatiques

FIGURE IV.2 Schéma de principe du plan de surveillance radiologique en champ proche d'une installation nucléaire fluviale par l'IRSN.

IV.2 LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT AUTOUR DES ANCIENS SITES MINIERES

L'exploitation industrielle de l'uranium en France a duré près de 50 ans. La quasi-totalité de ces anciens sites miniers est aujourd'hui passée sous la responsabilité d'AREVA-NC.

Un recensement exhaustif de l'ensemble des anciens sites d'exploration, d'exploitation et de traitement de minerai d'uranium, a été entrepris par l'IRSN dans le cadre d'un programme intitulé MIMAUSA (Mémoire et impact des mines d'uranium : synthèse et archives) à la demande du ministère de l'Écologie (MEEDM). L'ensemble des données disponibles est accessible sous forme de fiches *via* une interface cartographique sur le site Internet de l'IRSN (www.irsn.fr).

Les activités d'exploration, d'exploitation et de traitement de minerai d'uranium ainsi que le stockage de résidus de traitement, ont concerné, en France, 210 sites répartis sur 25 départements. Leur taille ainsi que les quantités de minerais qui ont été extraits sont très hétérogènes, allant du simple chantier de reconnaissance à des ouvrages importants ayant conduit à la production de plusieurs milliers de tonnes d'uranium (Figure IV.3). L'exploitation et le traitement du minerai d'uranium ont conduit à générer deux types de matériaux ou déchets : les stériles et les résidus de traitement.

– **Les stériles**, roches excavées pour accéder au minerai, se distinguent des autres roches présentes dans les zones concernées uniquement par leur localisation à proximité de zones minéralisées. Ils sont généralement plus riches en uranium que les roches avoisinantes, avec des

teneurs allant de quelques dizaines à quelques centaines de g/t soit quelques Bq à quelques dizaines de Bq/g en activité totale (Tableau IV.1). Les stériles ont été soit conservés en vrac sur leur lieu d'extraction, soit utilisés pour l'aménagement des stockages de résidus de traitement, soit utilisés pour le remodelage des sites. Une fraction a également été réutilisée dans le domaine public.

– **Les résidus de traitement** sont des déchets industriels qui se différencient de la roche initiale du fait des modifications physiques (broyage) et minéralogiques induites par les traitements chimiques. Leur activité totale, tous radionucléides confondus, est de l'ordre de la centaine à plusieurs centaines de Bq/g. Ils s'apparentent en cela à des déchets radioactifs de faible à très faible activité et à vie longue. Ainsi, plus de 50 millions de tonnes de résidus sont actuellement répartis sur 17 sites de stockage.

Après exploitation, l'ensemble des sites a été réaménagé de manière à les mettre en sécurité, à réduire leur impact radiologique et à effectuer leur intégration paysagère. Les travaux miniers souterrains ont été partiellement remblayés puis noyés. Les accès aux galeries ont été condamnés, les puits scellés. Les mines à ciel ouvert ont été soit noyées, créant ainsi des plans d'eau artificiels, soit remblayées avec des stériles ou encore utilisées comme site de stockage pour les résidus de traitement.



FIGURE IV.3 Localisation des zones minières françaises (programme MIMAUSA).

On retrouve dans les résidus tous les radionucléides initialement présents dans le minerai à l'exception de l'uranium dont l'essentiel a été extrait et concentré sous forme de « yellow cake ». Il s'agit en particulier de tous les descendants de l'uranium 238, dont on peut citer, en particulier, le ²³⁰Th (période 77 000 ans) et le ²²⁶Ra (période 1 600 ans). Les activités massiques des résidus de traitement de minerais d'uranium sont comparées à différents types de roches ou de minerais dans le Tableau IV.1.

TABLEAU IV.1 Ordres de grandeur de la radioactivité associée à plusieurs grands types de roche, des minerais et des résidus miniers (Bq/g).

| | Activité en radium | Activité totale |
|--|--------------------|------------------------|
| Minerais d'uranium | 10 - 70 | 180 - 900 (1 - 5 %) |
| Résidus miniers | 10 - 70 | 100 - 700 |
| Roches granitiques | 0,04 - 0,3 | 0,7 - 6 |
| Basaltes ou certaines roches sédimentaires | 0,0003 - 0,03 | 0,005 - 0,5 |
| Stériles | 0,05 - 5 | 1 - 100 |

La gestion des résidus de traitement de minerais d'uranium est soumise à la réglementation concernant les Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

En effet, ces résidus constituent une source de contamination de l'environnement et d'exposition à la radioactivité de par leur potentiel d'émission de radon, mais surtout leur lessivage par des eaux de pluie ou de ruissellement. Ainsi, sur certains sites de stockage, les caractéristiques des eaux collectées nécessitent un traitement avant de pouvoir être rejetées vers l'environnement. Plusieurs stations de traitement de l'eau sont encore aujourd'hui exploitées par AREVA. Malgré ces traitements, les rejets d'eau autorisés hors de certains sites peuvent conduire à une augmentation de la radioactivité des cours d'eau en aval ainsi qu'au dépôt de sédiments présentant des teneurs élevées en uranium, au fond des plans d'eau ou sur les berges.

Afin d'être en mesure d'apprécier l'impact radiologique des sites de stockage de ces résidus sur les populations et de vérifier l'efficacité des aménagements mis en place par AREVA, un contrôle des eaux d'exhaure avant rejet et une surveillance de différents compartiments de l'environnement sont imposés par arrêté préfectoral pour chacun des sites de stockage.

En complément de la surveillance exercée par AREVA, qui répond aux exigences réglementaires et qui est souvent renforcée à son initiative, des contrôles sont effectués par la DREAL, notamment lors d’inspections inopinées avec prise d’échantillons pour analyse. Des campagnes de mesures ponctuelles sont menées également par plusieurs organismes – dont l’IRSN. Ces campagnes peuvent faire suite à des questionnements de la part des populations, d’élus, d’associations locales ou nationales ou en réponse à la demande des autorités.

En plus de ces mesures ponctuelles, l’IRSN effectue une surveillance régulière de l’environnement autour de quelques anciens secteurs miniers parmi les plus importants en termes de tonnage d’uranium extrait ou de résidus de minerais stockés. Cette surveillance est focalisée essentiellement sur le milieu aquatique et l’exposition externe.

LES MINES

En 2009, la surveillance des sites miniers était centrée sur la division minière de La Crouzille et quelques sites de Vendée. L’Institut a engagé en 2009 une réflexion visant à optimiser cette surveillance, qui devrait se traduire en 2011 par le démarrage d’une étude pilote sur la base de la démarche de constats radiologiques régionaux, adaptée à la thématique des anciens sites miniers.

Division minière de La Crouzille (87)

Le 25 novembre 1948, la pechblende massive est découverte à La Crouzille (Haute-Vienne). Les travaux miniers débutent aussitôt. Les premières tonnes de pechblende françaises sont extraites. Ce gisement, historique dans l’extraction de l’uranium français, sera exploité jusqu’en juillet 1957, fournissant au total 148 tonnes d’uranium métal qui alimenteront les premières piles atomiques françaises.

La prospection intensifiée en Limousin aboutit dès 1951 à la découverte des principaux gisements de la région (Les Sagnes, Margnac, Fanay, Brugeaud...) qui feront de la division minière de La Crouzille le plus important district uranifère français. Dans les années 90, les mines sont fermées et sécurisées. Les eaux souterraines sont canalisées et traitées avant d’être rejetées dans l’environnement.

Dans le cadre du suivi de l’évolution de la radioactivité de cette division minière, des prélèvements d’eau sont réalisés mensuellement ou trimestriellement dans des cours d’eau et des étangs.

Les résultats des analyses réalisées en 2009 sont présentés par secteurs dans les Tableaux IV.2 à IV.5.

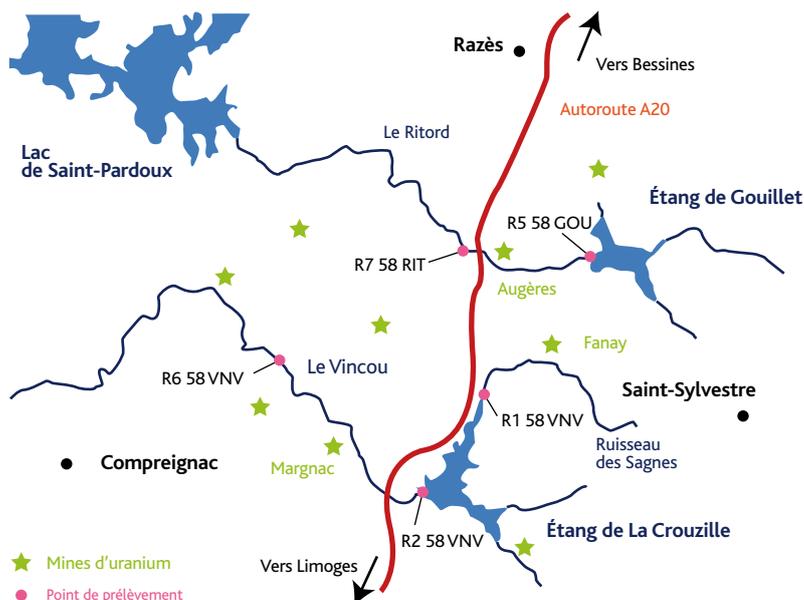


FIGURE IV.4 Schéma du plan de prélèvements dans les eaux de surface du secteur minier de la division de La Crouzille.

Secteur de l’étang de La Crouzille

L’étang de La Crouzille est notamment alimenté par le ruisseau des Sagnes qui traverse le site minier de Fanay. Cet étang alimente lui-même le Vincou, ruisseau qui traverse plusieurs secteurs miniers au niveau de Margnac (Figure IV.4). La surveillance de ce secteur est réalisée à partir de prélèvements ponctuels d’échantillons d’eaux :
 – dans le ruisseau des Sagnes en aval du site minier de Fanay (à environ 500 m en aval du site) ;
 – dans le ruisseau du Vincou en aval du site de Margnac (à environ 1 km en aval du site).

TABLEAU IV.2 Activités mesurées dans les eaux prélevées en 2009 dans le secteur de l’étang de La Crouzille.

| | Élément | Unité | Ruisseau des Sagnes | Le Vincou |
|----------------|--------------------|-------|---------------------|----------------|
| Eau de surface | ²²⁶ Ra | Bq/L | 0,143 ± 0,012 | 0,022 ± 0,0058 |
| | Alpha global | Bq/L | 0,636 ± 0,042 | 0,146 ± 0,024 |
| | Bêta global | Bq/L | 0,771 ± 0,031 | 0,261 ± 0,076 |
| | U pondéral calculé | µg/L | 24,8 ± 1 | 5,11 ± 0,35 |

Secteur de l'étang de Gouillet

Trois ruisseaux alimentent l'étang de Gouillet, qui lui-même alimente le Ritord, une rivière qui collecte les rejets de plusieurs sites miniers (dont celui d'Augères) avant de rejoindre le lac de Saint-Pardoux (Figure IV.4). Un premier prélèvement est réalisé à l'étang de Gouillet, et un second dans le Ritord à Razès (à environ 1 km en aval du site d'Augères).

TABLEAU IV.3 Activités moyennes mesurées dans les eaux prélevées en 2009 dans le secteur de l'étang de Gouillet.

| | Élément | Unité | Étang de Gouillet | Le Ritord à Razès |
|----------------|--------------------|-------|-------------------|-------------------|
| Eau de surface | ²²⁶ Ra | Bq/L | 0,0140 ± 0,0022 | 0,0494 ± 0,0046 |
| | Alpha global | Bq/L | 0,0305 ± 0,003 | 0,247 ± 0,019 |
| | Bêta global | Bq/L | 0,069 ± 0,011 | 0,360 ± 0,022 |
| | U pondéral calculé | µg/L | 0,429 ± 0,027 | 11,90 ± 0,66 |

TABLEAU IV.4 Activités moyennes mesurées dans les eaux prélevées en 2009 dans le secteur de Bessines.

| | Élément | Unité | La Gartempe à Pont Romain |
|----------------|--------------------|-------|---------------------------|
| Eau de surface | ²²⁶ Ra | Bq/L | 0,0155 ± 0,0023 |
| | Alpha global | Bq/L | 0,0302 ± 0,0032 |
| | Bêta global | Bq/L | 0,117 ± 0,014 |
| | U pondéral calculé | µg/L | 0,895 ± 0,057 |

TABLEAU IV.5 Activités moyennes mesurées dans les eaux prélevées en 2009 dans l'environnement du site de Vendée.

| | Élément | Unité | La Moine (aval du site) | Sèvre Nantaise (aval du site) |
|----------------|--------------------|-------|-------------------------|-------------------------------|
| Eau de surface | ²²⁶ Ra | Bq/L | < 0,016 | < 0,016 |
| | Alpha global | Bq/L | 0,0539 ± 0,0038 | 0,0382 ± 0,0038 |
| | Bêta global | Bq/L | 0,325 ± 0,013 | 0,236 ± 0,016 |
| | U pondéral calculé | µg/L | 2,64 ± 0,48 | 0,535 ± 0,037 |

Secteur de Bessines

La Gartempe est une rivière longeant la zone minière de Bessines. Un prélèvement est réalisé mensuellement à Châteauponsac, à 5 km en aval de la zone minière de la Gartempe.

Les concentrations en activité alpha global et en isotopes naturels mesurées dans les eaux prélevées en proche aval des sites miniers (Sagnes à Saint-Sylvestre, Vincou à Margnac et Ritord à Razès) témoignent d'un marquage en relation avec l'activité passée de ces sites miniers. À titre indicatif, au niveau de ces stations de prélèvement, les activités alpha global annuelles moyennes comprises entre 0,15 et 0,64 Bq/L, sont supérieures à la valeur guide fixée en application du code de la santé publique (CSP) pour les eaux destinées à la consommation humaine (0,1 Bq/L). D'autre part, les concentrations en uranium pondéral sont parfois proches (une seule fois supérieures), de la valeur guide de 15 µg/L d'uranium préconisé par l'OMS pour l'eau de boisson. Ces concentrations sont dans la gamme des niveaux observés dans des eaux en contact avec des roches uranifères.

Lorsque les prélèvements sont réalisés en des points qui bénéficient d'une dilution plus importante par rapport à la localisation des sites miniers, étang de Gouillet et Châteauponsac sur la Gartempe, les concentrations ne témoignent pas alors d'un marquage particulier.

Site de Vendée (44)

Le site de Vendée, situé sur la commune de Gétigné (Loire-Atlantique), comprenait 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 sont réalisés mensuellement.

La Moine est une rivière qui coule dans une vallée où est situé le site minier de l'Écarpière. En aval du site, elle se jette dans la Sèvre nantaise au niveau de Clisson. Un premier prélèvement d'eau 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.

Les niveaux d'activités mesurés ne soulignent pas de marquage particulier, qui serait en relation avec les activités minières passées. Les activités alpha global et bêta global restent inférieures aux valeurs guides fixées par le CSP pour les eaux destinées à la consommation humaine. Enfin, les concentrations en uranium pondéral restent, en moyenne, inférieures à la valeur de référence fixée par l'OMS pour la concentration en uranium dans l'eau destinée à la consommation humaine.

IV.3 LA SURVEILLANCE DES INDUSTRIES SITUÉES EN AMONT DANS LE CYCLE DU COMBUSTIBLE

Les usines de traitement et concentration situées près des mines délivrent essentiellement des uranates (contenant environ 70 % d'uranium) et parfois des oxydes (pouvant contenir jusqu'à 80 % d'uranium). Aujourd'hui, c'est l' UO_2 faiblement enrichi à 3-5 % en uranium 235 qui constitue la matière finale du combustible des réacteurs à eau sous pression (REP). Dans les usines actuelles, l'opération d'enrichissement se fait sur un composé chimique ultra pur, l'hexafluorure d'uranium (UF_6) obtenu par conversion des concentrés miniers.

En France, deux usines de la société COMURHEX (groupe AREVA) travaillent en série pour produire l' UF_4 et l' UF_6 . À Malvésès près de Narbonne, les concentrés de minerai sont transformés en UF_4 . À Pierrelatte, dans la vallée du Rhône, la seconde usine assure la conversion de l' UF_4 en UF_6 . L'uranium est ensuite transféré à l'usine d'enrichissement EURODIF (également à Pierrelatte) sous forme d' UF_6 solide. Les trois isotopes de l'uranium présents à l'état naturel (uranium 234, 235 et 238) sont séparés sélectivement lors du passage de l' UF_6 gazeux au travers d'une paroi poreuse (barrière de diffusion gazeuse). Les isotopes les plus légers traversant plus facilement ces barrières que les plus lourds, le procédé permet un enrichissement sélectif et progressif. Après l'opération d'enrichissement à l'usine d'EURODIF, l' UO_2 est transféré à l'usine FBFC de Romans-sur-Isère (fabrication des assemblages de combustible pour les centrales nucléaires dites « à eau légère »).

La surveillance continue de l'environnement par l'IRSN des sites de Malvésès et Tricastin (Pierrelatte), est ciblée sur le contrôle des voies de transfert de l'uranium et de ses descendants.

SITE DE MALVÉSÈS (11)

Implantée depuis 1959 à 3 km au nord de Narbonne, l'usine COMURHEX de Malvésès produit annuellement 14 000 tonnes de tétrafluorure d'uranium (UF_4), soit un quart de la production mondiale, à partir de concentrés d'uranium (« yellow cake »). Le procédé industriel mis en œuvre entraîne des rejets d'uranium dans l'air par la cheminée du site, et dans les canaux environnants par les conduites de rejets d'effluents liquides.



- Principales routes
- === Autoroutes
- Eau
- Forêt et zones agricoles
- Bâti et zones d'activité



© IFEN-Corine land cover 2000 ®

FIGURE IV.5 Situation géographique du site de COMURHEX Malvésès.

Entre 1960 et 1980, le site a également utilisé de l'uranium provenant du traitement de combustibles nucléaires irradiés effectué par l'usine de Marcoule (Gard). Des déchets produits à cette époque, contenant notamment du plutonium, de l'américium 241 et du technétium 99, ont été entreposés dans des bassins, sur le site même de l'usine, et sont toujours en place.

Enfin, depuis la création du site, des changements d'émissaires de rejet sont intervenus et des événements se sont produits (débordements de bassins exutoires des rejets, inondations dues aux intempéries).

Eaux de surface

Les résultats des analyses mensuelles des eaux de surface prélevées dans l'environnement sous influence des rejets liquides de l'usine COMURHEX montrent un léger marquage en uranium, dont l'activité de ses isotopes et de ses descendants explique l'activité alpha globale mesurée. La concentration en uranium pondéral calculée à partir des activités des isotopes de l'uranium est inférieure à la limite de 15 µg/L fixée par l'OMS pour les eaux destinées à la consommation humaine. Dans l'eau prélevée à la résurgence de l'Oeillal, dans le canal de Cadariège comme dans le canal du Tauran, la moyenne de l'activité alpha globale est inférieure ou proche de la valeur guide fixée en application du CSP pour les eaux destinées à la consommation humaine (0,1 Bq/L pour ce paramètre). En ce qui concerne l'activité bêta globale, elle est inférieure à la valeur guide de 1 Bq/L fixée en application du CSP pour les eaux destinées à la consommation humaine, en tous lieux de prélèvement autour du site.

SITE DU TRICASTIN (26)

Le site industriel du Tricastin regroupe depuis les années 1960 plusieurs activités liées à la fabrication (COMURHEX, EURODIF, FBFC, SOCATRI) et à l'exploitation du combustible nucléaire (AREVA, CEA, EDF). Dans ce paragraphe sont présentés les résultats de la surveillance spécifique aux installations exploitées par AREVA (COMURHEX, EURODIF, SOCATRI et AREVA-NC) et par le CEA. Le paragraphe suivant présente les résultats de la surveillance des CNPE, dont celui du Tricastin. L'environnement du site nucléaire du Tricastin fait l'objet d'une surveillance qui a été révisée en 2009 (Figure IV.8). Outre les dispositifs DTL et Téléray, cette surveillance comprend des prélèvements d'aérosols, d'eaux de pluie prélevées sous les vents dominants, de laits, d'herbes et de productions végétales, d'eaux de surface, de végétaux aquatiques et de sédiments.

Compartiment atmosphérique

Aucune activité gamma ambiante anormale n'a été enregistrée par les dosimètres environnants ou par la balise Téléray.

L'environnement du site du Tricastin a fait l'objet en 2009 d'un suivi quotidien des indices d'activité volumique bêta global et alpha global. Ce suivi est assuré par trois stations de prélèvement d'aérosols, l'une implantée sous les vents dominants du CNPE du Tricastin, une autre sur le site AREVA-EURODIF et la dernière sur le site d'AREVA-Pierrelatte qui assure les suivis quotidiens des activités volumiques bêta global et alpha global depuis 2001.

TABEAU IV.6 Activités moyennes mesurées dans les eaux prélevées en 2009 dans les canaux du Tauran et de Cadariège, de la résurgence de l'Oeillal et du lac artificiel de l'étang récepteur de Malvési.

| | Point de prélèvement | Élément | Unité | Activité |
|----------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| Eau de surface | Canal du Tauran | ²²⁶ Ra | Bq/L | 0,0159 ± 0,0026 |
| | | U pondéral calculé* | µg/L | 3,43 ± 0,75 |
| | | Alpha global | Bq/L | 0,0729 ± 0,0080 |
| | | Bêta global | Bq/L | 0,158 ± 0,013 |
| | Canal de Cadariège | ²²⁶ Ra | Bq/L | 0,0186 ± 0,0029 |
| | | U pondéral calculé* | µg/L | 1,21 ± 0,26 |
| | | Alpha global | Bq/L | 0,0529 ± 0,0077 |
| | | Bêta global | Bq/L | 0,207 ± 0,019 |
| | Résurgence de l'Oeillal | ²²⁶ Ra | Bq/L | 0,0304 ± 0,0033 |
| | | U pondéral calculé* | µg/L | 2,22 ± 0,40 |
| | | Alpha global | Bq/L | 0,112 ± 0,010 |
| | | Bêta global | Bq/L | 0,246 ± 0,024 |
| Lac artificiel (étang récepteur) | ²²⁶ Ra | Bq/L | 0,0204 ± 0,0031 | |
| | U pondéral calculé* | µg/L | 13,7 ± 3,0 | |
| | Alpha global | Bq/L | 0,168 ± 0,026 | |
| | Bêta global | Bq/L | 0,426 ± 0,04 | |

* U pondéral calculé à partir des isotopes mesurés de l'uranium.

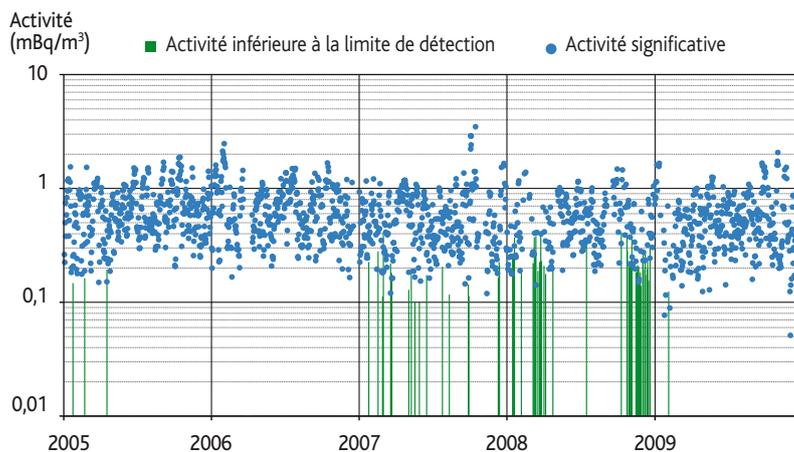


FIGURE IV.6 Activité volumique bêta global des aérosols dans l'environnement du site du Tricastin de 2005 à 2009.

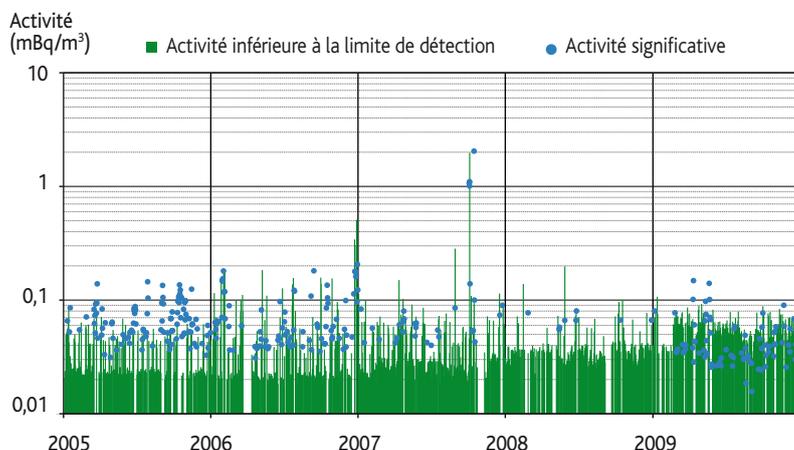


FIGURE IV.7 Activité volumique alpha global des aérosols dans l'environnement du site du Tricastin de 2005 à 2009.

En 2009, les indices d'activité volumique alpha ou bêta sont du même ordre de grandeur que les valeurs habituellement mesurées depuis 2005 (Figures IV.6 et IV.7).

En complément du suivi des indices d'activité alpha et bêta, des spectrométries gamma réalisées sur les

regroupements hebdomadaires de filtres d'aérosols permettent de quantifier les radionucléides émetteurs gamma potentiellement rejetés par les installations implantées du site. En 2009, les résultats de ces analyses n'ont mis en évidence aucune activité décelable dans l'environnement.

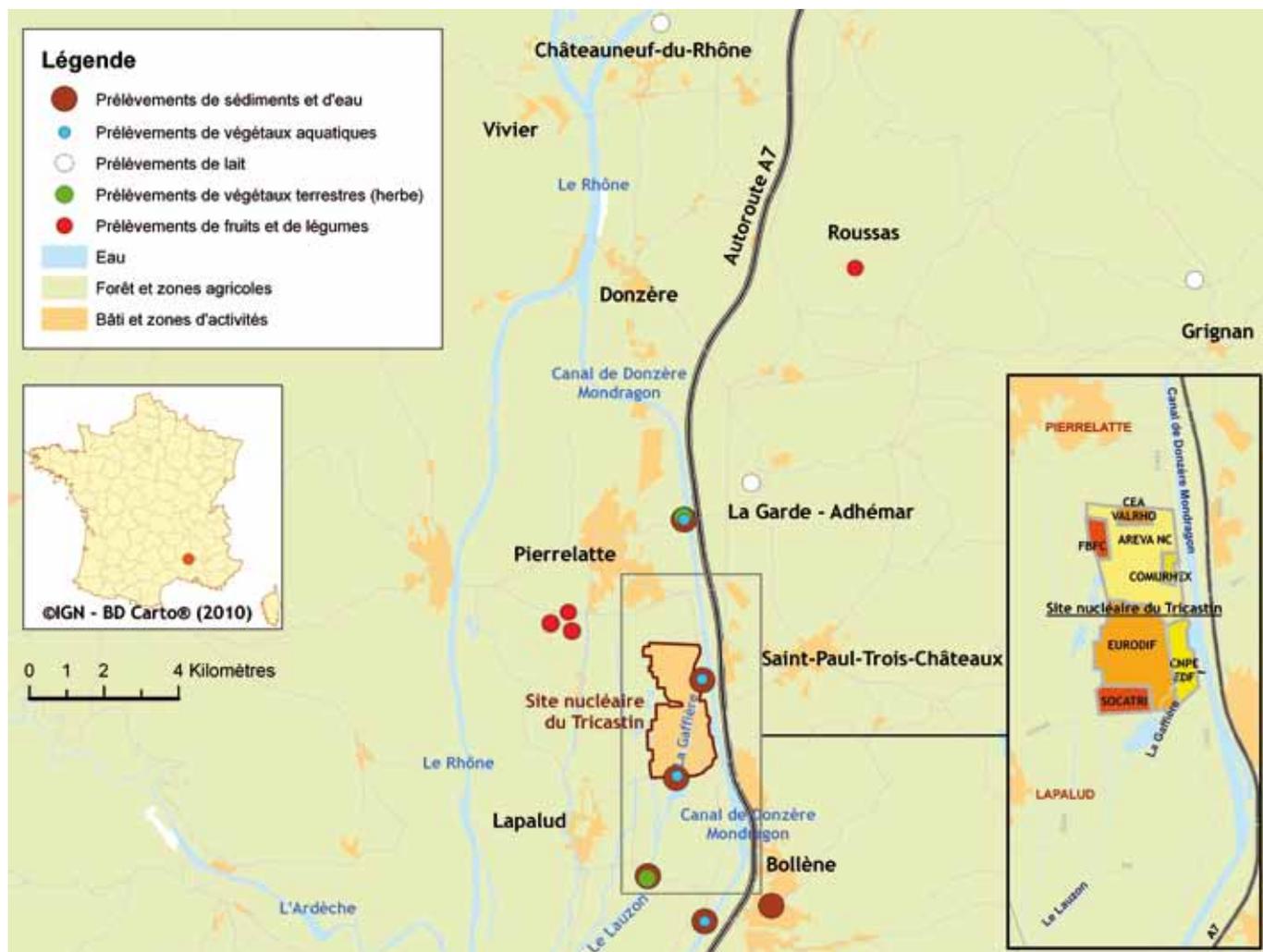


FIGURE IV.8 Plan de prélèvements réalisé en 2009 dans l'environnement du site du Tricastin (compartiments terrestre et aquatique).

Eaux de pluie

Deux collecteurs d'eaux de pluie sont présents sur le site. L'eau de pluie est collectée à une fréquence hebdomadaire et fait l'objet de mesures sur les regroupements mensuels. En dehors du tritium parfois présent en faible quantité, aucune activité anormale n'a été détectée dans les eaux de pluies recueillies sur le site du Tricastin (Tableau IV.7).

TABLEAU IV.7 Activités moyennes (Bq/L) mesurées dans les eaux prélevées en 2009 aux points « Les Genêts » et « Planches ».

| | Point de prélèvement | Élément | Activité (Bq/L) |
|--------------|----------------------|----------------|-----------------|
| Eau de pluie | Les Genêts | ³ H | 4,59 ± 0,77 |
| | | Alpha global | 0,0086 ± 0,0015 |
| | | Bêta global | 0,065 ± 0,014 |
| | Planches | ³ H | < 4,59 |
| | | Alpha global | 0,0093 ± 0,0016 |
| | | Bêta global | 0,056 ± 0,01 |

Compartiment terrestre

Végétaux terrestres et productions végétales

Des prélèvements de végétaux (herbes) sont effectués à proximité du site, sur un axe nord-sud. En complément, trois fruits et légumes cultivés à Pierrelatte ont été analysés. Les résultats (Tableau IV.8) indiquent que l'activité majeure est celle du potassium 40. Une activité très faible en césium 137 est identifiée dans la salade. Des traces d'isotopes du plutonium sont décelées dans les échantillons d'herbes prélevés au sud du site. De l'uranium est mesuré sur la quasi-totalité des prélèvements, dans des gammes d'activités identiques à celles des herbes et végétaux prélevés hors influence potentielle des rejets. La variabilité observée s'explique en partie par types de sols prélevés d'un point à l'autre. Les activités en tritium libre sont inférieures ou du même ordre que les limites de détection. Elles ne diffèrent pas des activités mesurées sur des matrices identiques dans des zones considérées hors influence de rejet d'installation.

Lait

Le lait prélevé en quatre points autour de Tricastin ne présente aucune activité artificielle supérieure aux limites de détection (Tableau IV.9). Les activités en potassium mesurées (57 à 65 Bq/L) sont du même ordre de grandeur que celles des prélèvements de lait réalisés en différents points du territoire en dehors de toute influence potentielle d'installation nucléaire (voir Chapitre III).

TABLEAU IV.9 Activités mesurées dans le lait de vache prélevé en 2009 dans l'environnement du site nucléaire du Tricastin (Bq/L).

| | | Grignan | Châteauneuf-du-Rhône | La Garde Adhémar | Roussas |
|------|-------------------|------------|----------------------|------------------|------------|
| Lait | ⁴⁰ K | 57,7 ± 5,6 | 66,0 ± 5,8 | 57,9 ± 5,4 | 65,0 ± 5,8 |
| | ¹⁰⁶ Ru | < 1,64 | 1,9 | nm | < 1,78 |
| | ¹³⁴ Cs | < 0,17 | < 0,17 | < 0,16 | < 0,18 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,22 | < 0,18 | < 0,19 | < 0,20 |
| | ⁹⁰ Sr | < 0,05 | < 0,041 | nm | nm |
| | ³ H | < 4,5 | nm | < 4,6 | nm |

nm : non mesuré

TABLEAU IV.8 Activités mesurées dans les productions végétales prélevées en 2009 à proximité du site du Tricastin.

| | | Herbes | | Nectarines | Navets | Salade |
|---------------------------------|---|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| | | Bq/kg sec* | | Bq/kg frais* | | |
| | | Nord du site | Sud du site | | | |
| Herbes et productions végétales | ⁴⁰ K | 372 ± 46 | 692 ± 69 | 65 ± 6 | 83 ± 9 | 68 ± 7 |
| | ⁶⁰ Co | < 1,26 | < 1,76 | < 0,016 | < 0,058 | < 0,033 |
| | ¹³⁷ Cs | < 1,28 | < 1,69 | < 0,011 | < 0,07 | 0,066 ± 0,012 |
| | Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ¹²⁵ Sb, ^{110m} Ag, ¹³⁴ Cs...) | < 8,38 | < 8,89 | < 0,026 | < 0,055 | < 0,074 |
| | ²³⁴ U | 0,53 ± 0,13 | 0,22 ± 0,17 | < 0,029 | < 0,028 | < 0,12 |
| | ²³⁵ U | < 0,19 | < 0,19 | < 0,016 | nm | < 0,030 |
| | ²³⁸ U | 0,48 ± 0,12 | 0,26 ± 0,16 | < 0,029 | 0,019 ± 0,013 | 0,094 ± 0,029 |
| | ²⁴¹ Am | < 0,006 | < 0,014 | nm | nm | nm |
| | ²³⁸ Pu | < 0,009 | 0,035 ± 0,011 | nm | nm | nm |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | < 0,009 | 0,085 ± 0,017 | nm | nm | nm |
| ¹⁴ C (Bq/kg C) | nm | nm | nm | nm | 235,5 ± 1,3 | |
| ³ H libre (Bq/L) | 4,6 ± 1,6 | < 6,3 | 5,1 ± 2,0 | < 4,6 | < 4,6 | |

* Sauf indication contraire

nm : non mesuré



FIGURE IV.9 Prélèvement d'eau de surface dans la Gaffière à la sortie du site du Tricastin.

Compartiment aquatique continental

Eaux de surface

Aucune activité anormale n'a été détectée par les analyses des prélèvements d'eaux de surface réalisés dans l'environnement du site du Tricastin.

Les résultats présentés dans le Tableau IV.10 indiquent que les activités en tritium et bêta global restent inférieures aux limites de détection. Ces résultats ne mettent pas en évidence une différence de concentration en radionucléides détectés, d'origine artificielle, entre l'amont et l'aval du site.

TABLEAU IV.10 Activités moyennes mesurées dans les eaux prélevées en 2009 dans la Gaffière et dans le canal de Donzère.

| | Élément | Unité | Gaffière amont Tricastin | Canal de Donzère Mondragon | Lauzon aval Tricastin | Gaffière aval Tricastin |
|----------------|---------------------|-------|--------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Eau de surface | ¹³⁷ Cs | Bq/L | < 0,86 | < 0,79 | < 0,81 | < 0,80 |
| | ³ H | Bq/L | 4,1 ± 1,968 | < 5,5 | 5,1 ± 2 | 4,3 ± 2,021 |
| | Bêta global | Bq/L | < 0,12 | < 0,142 | < 0,12 | < 0,138 |
| | Alpha global | Bq/L | 0,0271 ± 0,0068 | 0,0316 ± 0,0058 | 0,078 ± 0,011 | 0,13 ± 0,026 |
| | U pondéral calculé* | µg/L | nm | nm | nm | 0,172 ± 0,025 |

* U pondéral calculé à partir des isotopes mesurés de l'uranium

Sédiments

Les activités en césium 137, seul radionucléide d'origine artificielle mesuré dans tous les prélèvements de sédiments, ne témoignent pas d'une différence entre l'amont et l'aval du site (Tableau IV.11). Cette présence de césium 137 est à mettre en relation avec les retombées atmosphériques des essais d'armes nucléaires passés

et de l'accident de Tchernobyl, la minéralogie et les caractéristiques physiques, en particulier la granulométrie, étant à l'origine des variations d'activité mesurées dans les différents échantillons. La détection de traces d'américium 241 en aval de la Gaffière est certainement liée aux activités nucléaires du site du Tricastin.

TABLEAU IV.11 Activités mesurées dans les sédiments aquatiques prélevées en 2009 à proximité du site du Tricastin.

| Sédiments aquatiques | Élément | Unité | Canal - amont site Tricastin | Gaffière - entrée site Tricastin | Gaffière - aval site Tricastin | Lauzon - aval site Tricastin | Canal - aval site Tricastin |
|----------------------|---------------------|-----------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | ¹³⁷ Cs | Bq/kg sec | 3,23 ± 0,55 | 1,78 ± 0,4 | 6,91 ± 0,97 | 1,86 ± 0,27 | 2,8 ± 0,37 |
| | ²⁴¹ Am | | < 0,11 | < 0,12 | 0,54 ± 0,14 | < 0,12 | < 0,12 |
| | U pondéral calculé* | | 1,29 ± 0,31 | 0,49 ± 0,068 | 3,93 ± 0,22 | 0,812 ± 0,019 | 1,62 ± 0,44 |

* U pondéral calculé à partir des isotopes mesurés de l'uranium

Végétaux aquatiques

Quatre prélèvements de végétaux aquatiques sont réalisés semestriellement à proximité du site nucléaire du Tricastin : deux en amont hydraulique du site (Gaffière et Canal de Donzère-Mondragon) et deux en sortie de site (Lauzon et Canal de Donzère-Mondragon).

L'analyse de ces végétaux indique une activité essentiellement due au potassium 40 de l'ordre de 800 Bq/kg sec. Des traces de césium 137 issues des retombées atmosphériques des tirs passés et de l'accident de Tchernobyl sont décelées en amont comme en aval du site.

Ces végétaux présentent des activités pour les isotopes 234 et 238 de l'uranium du même ordre de grandeur, comprises entre 4 et 17 Bq/kg sec, compatibles avec une

origine naturelle. L'absence de variations entre l'amont et l'aval ne permet pas de quantifier l'éventuel impact des rejets liquides du site sur l'environnement.

Le prélèvement de végétaux effectué en aval du site dans le canal présente des traces d'activité en américium et plutonium légèrement supérieures à celles mesurées en amont, suggérant un léger marquage par les rejets du site. En effet, le rapport d'activités $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ de l'ordre de 0,5 est caractéristique du combustible usé civil (celui des retombées atmosphériques des tirs d'armes des années 60 est de l'ordre de 0,025).

L'activité en tritium libre en amont du site est supérieure à celle mesurée en aval dans le canal. Elle pourrait s'expliquer par les rejets liquides des installations situées en amont sur le Rhône.

TABLEAU IV.12 Activités (Bq/kg sec)* mesurées dans les végétaux aquatiques prélevés en 2009 à proximité du site du Tricastin (potamots).

| | | Canal amont site Tricastin | Gaffière amont COMURHEX | Lauzon aval site Tricastin | Canal aval site Tricastin |
|---------------------------|--|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Végétaux aquatiques | ^{40}K | 778 ± 88 | 874 ± 115 | 804 ± 81 | 763 ± 93 |
| | ^{60}Co | < 1,56 | < 1,78 | < 1,48 | < 1,25 |
| | ^{137}Cs | < 1,58 | 1,68 ± 0,74 | < 1,33 | 1,29 ± 0,46 |
| | Autres émetteurs gamma (^{54}Mn , ^{125}Sb , ^{110m}Ag , ^{134}Cs ...) | < 3,72 | < 4,08 | < 3,39 | < 2,86 |
| | ^{234}U | 4,72 ± 0,43 | 8,16 ± 0,82 | 17,14 ± 1,37 | 4,50 ± 0,40 |
| | ^{235}U | 0,27 ± 0,06 | 0,45 ± 0,13 | 0,89 ± 0,12 | 0,22 ± 0,05 |
| | ^{238}U | 4,67 ± 0,42 | 8,32 ± 0,83 | 15,20 ± 1,22 | 4,10 ± 0,37 |
| | ^{241}Am | < 0,022 | nm | 0,024 ± 0,012 | 0,022 ± 0,011 |
| | ^{238}Pu | < 0,017 | nm | < 0,014 | 0,028 ± 0,002 |
| | $^{239+240}\text{Pu}$ | 0,025 ± 0,013 | nm | < 0,021 | 0,060 ± 0,021 |
| ^3H libre (Bq/L) | 10,0 ± 2,2 | nm | < 4,70 | 4,3 ± 2,0 | |

* Sauf indication contraire
nm : non mesuré

IV.4 LA SURVEILLANCE DES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Le parc français de centrales nucléaires est constitué de 58 réacteurs à eau pressurisée (REP) en exploitation, répartis sur 19 Centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) exploités par EDF. Ils sont tous situés à proximité d'un cours d'eau ou du littoral maritime, car l'eau constitue une source réfrigérante indispensable au bon fonctionnement des REP. En plus de ces réacteurs en exploitation, neuf réacteurs (UNGG, RNR, REP ou à neutrons rapides) sont en démantèlement et un réacteur est en construction (EPR) (Figure IV.10).

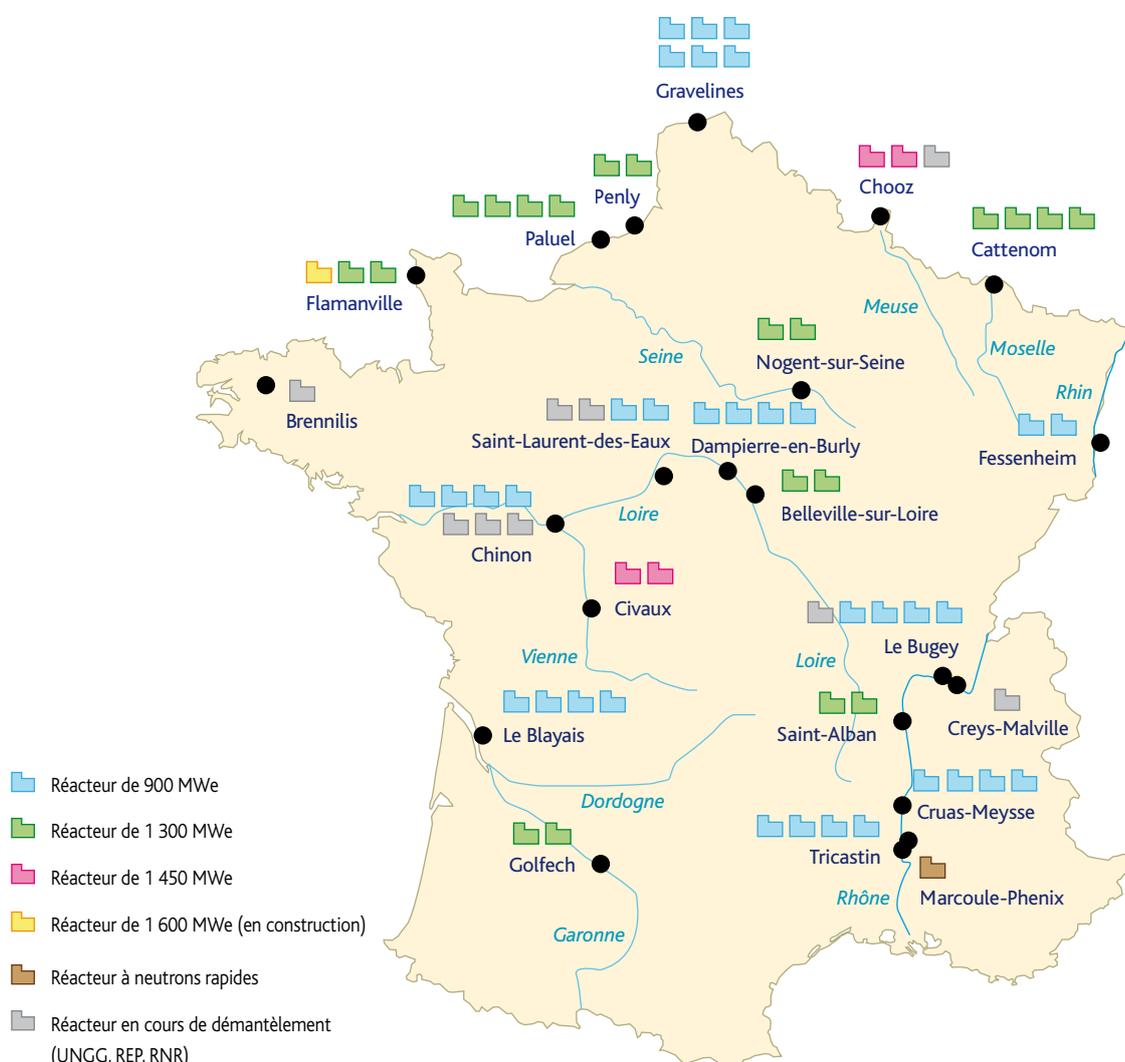


FIGURE IV.10 Implantations et typologie des CNPE français en 2009.

COMPARTIMENT ATMOSPHÉRIQUE

Téléray

Le débit d'équivalent de dose gamma ambiant mesuré autour des CNPE français reflète le niveau d'exposition local d'origine naturelle (Figure IV.11). Aucune surexposition due à l'activité de ces installations n'a été mise en évidence en 2009.

Dosimètres thermoluminescents

Le débit de dose intégrée sur une année dû à l'exposition externe, mesuré à partir des dosimètres thermoluminescents disposés à proximité des CNPE, varie de 0,4 à 1 mSv/an. Les différences d'un CNPE à l'autre sont dues à la variabilité naturelle du rayonnement tellurique.

À titre comparatif, la dose horaire est du même ordre de grandeur que celle obtenue à partir des mesures des sondes Téléray.

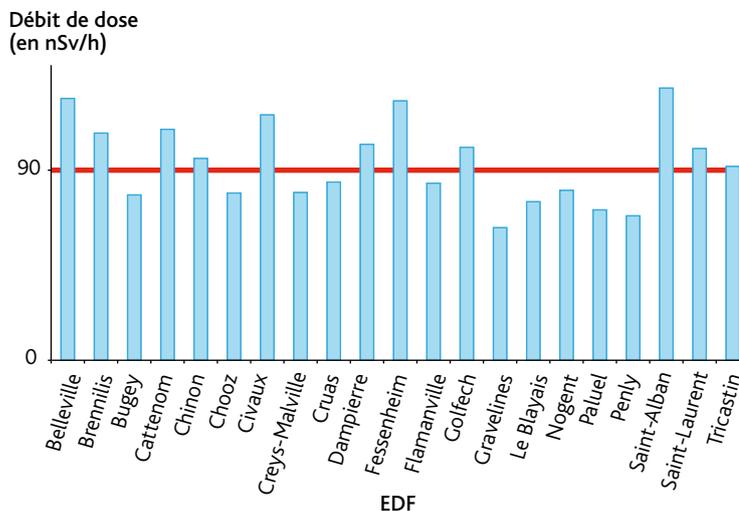


FIGURE IV.11 Moyenne des débits d'équivalent de dose gamma ambiant mesurés par les sondes Téléray autour de chaque CNPE français en 2009 (la moyenne nationale est reportée en orange à titre de comparaison).

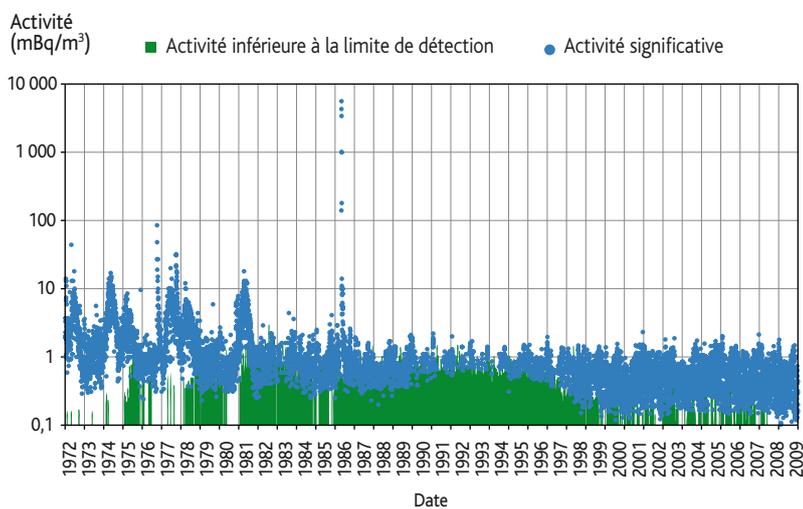


FIGURE IV.12 Suivi de l'activité volumique bêta global des aérosols dans l'environnement du CNPE du Bugey depuis 1972.

Aérosols

L'activité volumique bêta global autour de tous les sites où sont implantés des CNPE est suivie depuis les années soixante. Ces suivis montrent que les activités volumiques bêta global se sont stabilisées aux alentours de 0,5 mBq/m³ et n'évoluent plus depuis l'arrêt des derniers essais atmosphériques d'armes nucléaires effectués par la Chine en octobre 1980 (excepté lors de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl en 1986), comme l'illustrent les mesures provenant de la station du Bugey (Figure IV.12).

En complément du suivi de l'indice d'activité bêta, des spectrométries gamma réalisées sur les regroupements hebdomadaires des prélèvements effectués autour de chaque CNPE permettent de quantifier les radionucléides artificiels rejetés par ces installations. Les résultats montrent qu'aucun radionucléide émetteur gamma n'a pu être mesuré au-dessus du seuil de détection des appareils utilisés.

Il convient toutefois de préciser que la mesure des prélèvements d'aérosols ne permet pas de caractériser l'impact des rejets de tritium et de carbone 14, pour lesquels d'autres techniques de mesure doivent être mises en œuvre.

TABEAU IV.13 Activités gamma des regroupements hebdomadaires des filtres prélevés autour des CNPE, par les stations AS du réseau OPERA-Air.

| | Radionucléide | Activité volumique |
|----------|--------------------|---------------------------|
| Aérosols | ⁵⁴ Mn | < 0,08 mBq/m ³ |
| | ⁵⁸ Co | < 0,12 mBq/m ³ |
| | ⁶⁰ Co | < 0,08 mBq/m ³ |
| | ⁹⁵ Zr | < 0,24 mBq/m ³ |
| | ^{110m} Ag | < 0,08 mBq/m ³ |
| | ¹⁰⁶ Ru | < 0,64 mBq/m ³ |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,07 mBq/m ³ |
| | ¹³⁴ Cs | < 0,07 mBq/m ³ |

Activité du plomb 210 (mBq/m³)

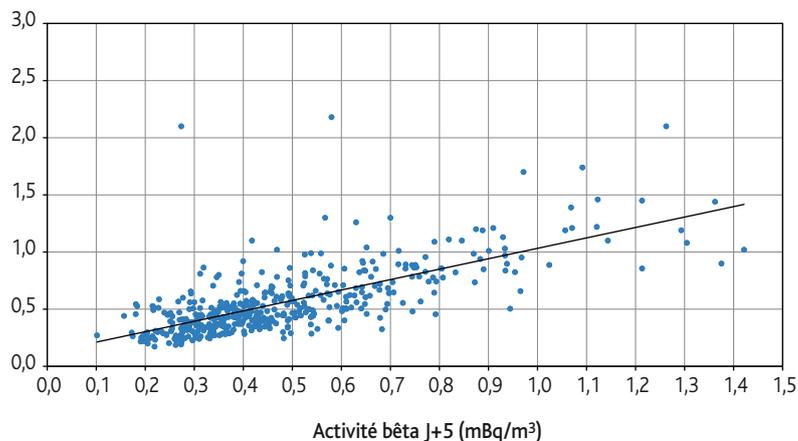


FIGURE IV.13 Corrélation entre l'activité bêta globale et l'activité en plomb 210 (radionucléide naturel appartenant à la chaîne de décroissance du radon 222) mesurées autour des CNPE au cours de l'année 2009.

Origine naturelle du comptage bêta

En 2009, l'activité bêta globale mesurée dans les aérosols prélevés dans l'environnement proche des CNPE est uniquement due à des radionucléides d'origine naturelle. Cette relation est illustrée par la corrélation entre l'activité du plomb 210 (émetteur bêta appartenant à la chaîne de décroissance du radon 222) et l'activité bêta globale. (Figure IV.13).

Eaux de pluie

Les eaux de pluie collectées en 2009 dans les stations situées à 1 km sous les vents dominants des CNPE, présentent des activités significatives en tritium pour les CNPE du Blayais, de Cruas, Cattenom, Penly et Tricastin (Figure IV.14). Ces activités sont à relier avec les rejets gazeux effectués par ces CNPE.

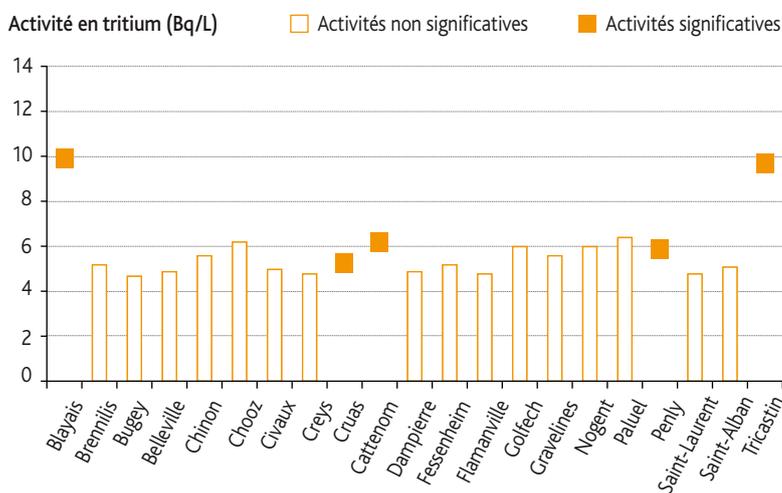


FIGURE IV.14 Activités maximales en tritium (Bq/L) mesurées dans les eaux de pluie prélevées en 2009 à proximité des CNPE.

COMPARTIMENT TERRESTRE

Le plan de surveillance régulière de l'IRSN autour des CNPE prévoit des prélèvements de végétaux terrestres et de productions agricoles dans des zones situées sous influence potentielle des rejets des installations, dans une zone comprise entre 0 et 10 km de l'installation. Ce plan comporte *a minima* un prélèvement de lait et un prélèvement de céréales, complétés le cas échéant par des prélèvements d'herbes, de légumes-feuilles, de vins, de viande et d'autres productions agricoles.

Flore terrestre

Dans le cas du site pilote du CNPE de Civaux, la radioactivité a été mesurée sur plusieurs bio-indicateurs : mousse, herbe et feuilles d'arbres.

Les résultats de 2009 sont comparables à ceux des années précédentes et indiquent que la radioactivité mesurée dans les végétaux est principalement due au potassium 40 d'origine naturelle (l'activité massique en ^{40}K des végétaux prélevés autour du CNPE varie en moyenne, selon l'espèce prélevée, entre 673 ± 3 et 954 ± 46 Bq/kg sec). Le seul radionucléide détecté, contenu dans le rejet des installations, est le carbone 14. Les activités mesurées ne mettent pas en évidence d'évolution anormale ($238 \pm 1,3$ Bq/kg de carbone) par rapport à celles mesurées hors zone influencée.

Pour le tritium, les résultats sont inférieurs aux limites de détection ($< 4,6$ Bq/L d'eau de lyophilisation).

Les limites de détection des autres radionucléides artificiels mesurés dans les végétaux prélevés dans l'environnement proche du CNPE de Civaux en 2009 sont présentées dans le Tableau IV.14.

TABLEAU IV.14 Activités mesurées en 2009 dans la flore terrestre du CNPE de Civaux (en Bq/kg sec).

| | Radionucléide (hors ^3H et ^{14}C) | Activité |
|--------------------------|---|---------------|
| Herbes, feuilles d'arbre | ^{40}K | 749 ± 118 |
| | ^{103}Ru | $< 1,1$ |
| | ^{106}Ru | $< 10,45$ |
| | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | $< 1,0$ |
| | ^{124}Sb | $< 2,5$ |
| | ^{131}I | $< 2,1$ |
| | ^{134}Cs | $< 1,1$ |
| | ^{137}Cs | $< 1,2$ |
| | ^{54}Mn | $< 1,2$ |
| | ^{58}Co | $< 1,2$ |
| | ^{60}Co | $< 1,2$ |

Productions agricoles et aliments

La surveillance de la radioactivité des productions agricoles et des denrées déployée autour des CNPE porte sur deux principales productions françaises : les céréales pour les productions d'origine végétale et le lait pour les productions d'origine animale. En complément, un suivi de la radioactivité des légumes-feuilles (type salade) a été progressivement mis en place depuis octobre 2008. Du fait de leur surface importante de captation des dépôts atmosphériques, les légumes-feuilles constituent un indicateur alimentaire pertinent, en particulier dans le cadre de la gestion d'une situation post-incidentelle ou post-accidentelle. De plus, des analyses sont effectuées annuellement sur des productions et aliments emblématiques de la région concernée.

Céréales

Les prélèvements de blé sont réalisés lors de la récolte annuelle, à partir d'un échantillonnage d'un à plusieurs silos situés sur les communes environnantes des centrales. En 2009, le réseau de surveillance des blés, mis en œuvre avec le concours de France Agrimer, couvre l'environnement de la quasi-totalité des CNPE, hormis le CNPE du Blayais.

Les activités massiques en potassium 40, radionucléide d'origine naturelle, sont comprises entre $90,9 \pm 15,6$ Bq/kg sec et $146,3 \pm 21,6$ Bq/kg sec, en fonction du bruit de fond de la région (voir Chapitre III.2).

Les radionucléides émetteurs gamma susceptibles d'être rejetés par les centrales REP ne sont pas détectés dans les échantillons de blé collecté aux abords des CNPE. Les activités massiques mesurées sont inférieures aux limites de détection précisées ci-après (Tableau IV.15).

TABLEAU IV.15 Activités mesurées en 2009 dans les céréales (Bq/kg frais).

| | Radionucléide | Activité |
|----------|---------------------------|--------------|
| Céréales | ^{40}K | 115 ± 15 |
| | ^{106}Ru | $< 6,54$ |
| | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | $< 0,81$ |
| | ^{124}Sb | $< 8,53$ |
| | ^{125}Sb | $< 1,61$ |
| | ^{134}Cs | $< 0,59$ |
| | ^{137}Cs | $< 0,58$ |
| | ^{54}Mn | $< 0,74$ |
| | ^{58}Co | $< 3,07$ |
| | ^{60}Co | $< 0,58$ |

Lait

Cette surveillance est réalisée à un rythme trimestriel sur des échantillons de laits de bovins ou de caprins prélevés au niveau de fermes, situées sous les vents dominants, dans un rayon inférieur à 10 km autour des centrales.

En 2009, la mise en œuvre d'un programme de surveillance des denrées, mutualisé avec la Direction générale de l'alimentation (DGAL), a permis de réaliser l'analyse de laits prélevés à proximité de tous les CNPE.

La radioactivité d'origine naturelle mesurée dans le lait est principalement due au ^{40}K dont l'activité volumique est comprise en moyenne entre 48,0 (lait de bovins) et 59,8 Bq/L (lait de caprins), selon le secteur géographique et l'origine du lait. Ces valeurs sont cohérentes avec celles mesurées dans les laits collectés à l'échelle du territoire (voir Chapitre III). Pour les radionucléides d'origine artificielle susceptibles d'être rejetés par les centrales et transférés dans le lait (^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^3H), les activités volumiques sont inférieures aux limites de détection précisées ci-contre (Tableau IV.16).

Légumes-feuilles

Cette surveillance a été mise en place en fin d'année 2008 avec la collaboration de la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF). En 2009, des prélèvements ont été réalisés à proximité de huit CNPE : Belleville, Saint-Laurent-des-Eaux, Penly, Gravelines, Fessenheim, Dampierre, Cruas et Chinon.

La radioactivité dans les échantillons de salade est principalement due à la présence de potassium 40 d'origine naturelle, dont les niveaux fluctuent entre $92,9 \pm 8,7$ Bq/kg frais et $169,9 \pm 17,3$ Bq/kg frais, selon le secteur géographique. L'activité massique en carbone 14 mesurée dans ces salades oscille entre $231,3 \pm 1,3$ Bq/kg C (Bq/kg de carbone) et $249,8 \pm 1,7$ Bq/kg C. Les activités massiques des autres radionucléides d'origine artificielle ($^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{58}Co , ^3H ...) susceptibles d'être rejetés par les centrales sont restées inférieures aux limites de détection (Tableau IV.17).

Autres productions agricoles (vins, fruits et légumes, viande)

Avec la collaboration de la DGAL et de la DGCCRF, l'IRSN a complété en 2009 son plan de surveillance régulier par l'analyse annuelle d'autres denrées représentatives des cultures implantées dans les zones potentiellement sous influence des rejets de neuf CNPE pour les fruits, les légumes et le vin.

TABLEAU IV.16 Activités mesurées en 2009 dans le lait (Bq/L).

| | Radionucléide | Lait de vache | Lait de chèvre |
|------|-------------------|----------------|----------------|
| Lait | ^{40}K | $48,0 \pm 2,4$ | $59,8 \pm 1,4$ |
| | ^{131}I | < 1,96 | < 4,81 |
| | ^{134}Cs | < 0,19 | < 0,19 |
| | ^{137}Cs | < 0,21 | < 0,22 |
| | ^3H | < 5,46 | < 5,25 |

TABLEAU IV.17 Activités mesurées en 2009 dans les légumes-feuilles (Bq/kg frais)*.

| | Radionucléide | Activité |
|--------|---------------------------|--------------|
| Salade | ^{40}K | 120 ± 26 |
| | ^{106}Ru | < 1,09 |
| | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | < 0,14 |
| | ^{124}Sb | < 0,49 |
| | ^{125}Sb | < 0,25 |
| | ^{134}Cs | < 0,11 |
| | ^{137}Cs | < 0,12 |
| | ^{54}Mn | < 0,13 |
| | ^{58}Co | < 0,17 |
| | ^{60}Co | < 0,14 |
| | ^3H libre (Bq/L) | < 4,7 |

* Sauf indication contraire

Dans les échantillons de fruits et légumes, deux radionucléides sont systématiquement quantifiés (Tableau IV.18) :

- le potassium 40 d'origine naturelle dont les activités varient de 37 Bq/kg frais (pommes prélevées à proximité de Saint-Alban) à 413 Bq/kg frais (poireaux prélevés à proximité de Flamanville) ;
- le carbone 14 dont l'activité varie de 234,3 Bq/kg C pour les épinards prélevés à proximité de Golfech à 249,0 Bq/kg C pour le céleri prélevé à proximité de Saint-Alban. Ces activités ne sont pas significativement différentes de celles mesurées dans des zones non influencées par les rejets.

Pour les autres radionucléides d'origine artificielle, aucune activité significative n'a été mise en évidence dans ces échantillons en dehors de traces de ¹³⁷Cs dans les poireaux de Nogent-sur-Seine (0,084 Bq/kg frais) et le céleri-branche de Saint-Alban (0,04 Bq/kg frais), à des niveaux proches des limites de détection. Ces activités sont attribuables à la rémanence des dépôts suite aux retombées atmosphériques passées (tirs d'armes nucléaires atmosphériques et accident de Tchernobyl).

TABLEAU IV.18 Activités mesurées en 2009 dans les fruits et légumes prélevés à proximité des CNPE (Bq/kg frais)*.

| CNPE | Nogent-sur-Seine | | Belleville | Flamanville | | | Gravelines | Chooz | Cruas |
|--|------------------|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------|----------------|-------------|----------|
| Nature | Fenouil | Poireau | Épinard | Chou blanc | Pomme à cidre | Poireau | Pomme de terre | Blette | Kiwi |
| ⁴⁰ K | 248 ± 29 | 142 ± 15 | 182 ± 23 | 98,6 ± 12,4 | 42,3 ± 5,7 | 413 ± 48 | 134 ± 17 | 120 ± 13 | 100 ± 12 |
| ⁶⁰ Co | nm | < 0,12 | < 0,08 | < 0,07 | < 0,09 | < 0,23 | < 0,11 | < 0,07 | < 0,10 |
| ¹⁰⁶ Ru | < 0,58 | < 0,70 | < 0,49 | nm | nm | < 1,23 | nm | nm | < 0,84 |
| ¹³¹ I | < 0,28 | < 0,33 | nm | < 0,77 | nm | nm | nm | nm | nm |
| ¹³⁷ Cs | < 0,14 | 0,084 ± 0,04 | < 0,11 | < 0,06 | < 0,09 | < 0,21 | < 0,10 | < 0,06 | < 0,10 |
| Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ¹²⁴ Sb, ^{110m} Ag, ¹³⁴ Cs...) | < 0,12 | < 0,23 | < 0,16 | < 0,13 | < 0,24 | < 0,38 | < 0,23 | < 0,13 | < 0,26 |
| ¹⁴ C* (Bq/kg C) | nm | nm | 235,3 ± 1,3 | 243,7 ± 1,3 | nm | 242,8 ± 1,3 | nm | 248,0 ± 1,3 | nm |
| ³ H libre (Bq/L) | nm | nm | < 4,6 | < 4,6 | < 4,9 | < 4,5 | < 4,7 | < 4,6 | nm |

| CNPE | Blayais | | | Golfech | Bugey | Saint-Alban | | | |
|--|-----------|------------|------------|-------------|--------------------|-------------|------------|----------------|-------------|
| Nature | Châtaigne | Radis | Asperge | Épinard | Pomme Granny Smith | Blette | Rhubarbe | Céleri-branche | Pomme Gala |
| ⁴⁰ K | 141 ± 18 | 78,2 ± 7,6 | 59,9 ± 6,5 | 272 ± 30 | 49,8 ± 6,3 | 226 ± 19 | 99,0 ± 8,7 | 63,5 ± 7,5 | 37,4 ± 5,0 |
| ⁶⁰ Co | < 0,26 | < 0,024 | < 0,05 | < 0,10 | < 0,10 | < 0,03 | < 0,03 | < 0,06 | < 0,08 |
| ¹⁰⁶ Ru | < 2,42 | nm | < 0,47 | nm | nm | < 0,27 | < 0,20 | nm | nm |
| ¹³¹ I | < 1,95 | nm | nm | < 0,07 | nm | nm | nm | < 0,26 | < 0,32 |
| ¹³⁷ Cs | < 0,28 | < 0,016 | < 0,05 | < 0,08 | < 0,09 | < 0,10 | < 0,04 | 0,04 ± 0,02 | 0,09 |
| Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ¹²⁴ Sb, ^{110m} Ag, ¹³⁴ Cs...) | < 0,72 | < 0,043 | < 0,27 | < 0,20 | < 0,27 | < 0,08 | < 0,06 | < 0,14 | < 0,22 |
| ¹⁴ C (Bq/kg C) | nm | nm | nm | 234,3 ± 1,3 | nm | nm | nm | 249,0 ± 1,3 | 238,5 ± 1,3 |
| ³ H libre (Bq/L) | nm | nm | < 4,5 | < 4,6 | < 4,60 | < 4,6 | < 4,2 | < 4,6 | < 4,6 |

* Sauf indication contraire
nm : non mesuré

Concernant les vins (*Tableau IV.19*), la seule activité significative relevée concerne le potassium 40 d'origine naturelle. Les activités pour ce radionucléide oscillent entre 11,0 Bq/L dans le Champagne et 36,3 Bq/L dans le vin rouge. Les activités des radionucléides d'origine artificielle sont restées inférieures aux limites de détection.

TABLEAU IV.19 Activités volumiques moyennes mesurées dans les vins prélevés en 2009 à proximité des CNPE (Bq/L).

| | | Rouge (Blayais, Belleville, Chinon, Cruas, Dampierre, St-Alban, Tricastin) | Blanc (Belleville) | Rosé (Golfech) | Champagne (Nogent-sur-Seine) |
|------|--------------------|--|-----------------------|-------------------|---------------------------------|
| Vins | ⁴⁰ K | 36,3 ± 13,8 | 19,1 ± 2,7 | 22,5 ± 2,9 | 11,0 ± 2,0 |
| | ⁵⁴ Mn | < 0,20 | < 0,18 | < 0,21 | < 0,15 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,19 | < 0,18 | < 0,18 | < 0,16 |
| | ¹⁰⁶ Ru | < 1,74 | < 1,50 | < 1,53 | < 1,27 |
| | ^{110m} Ag | < 0,21 | < 0,18 | < 0,17 | < 0,14 |
| | ¹²⁴ Sb | < 0,86 | < 0,58 | < 0,54 | < 0,51 |
| | ¹²⁵ Sb | < 0,45 | < 0,41 | < 0,44 | < 0,38 |
| | ¹³⁴ Cs | < 0,16 | < 0,16 | < 0,15 | < 0,13 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,19 | < 0,17 | < 0,17 | < 0,15 |
| | ³ H | < 14 | < 8,6 | < 10,4 | < 9,9 |

TABLEAU IV.20 Activités moyennes mesurées dans la viande (Bq/kg frais)* prélevée à proximité des CNPE de Chooz et Civaux.

| | | CNPE (nature) | Civaux (bœuf) | Chooz (sanglier) |
|--------|-----------------------|---------------|---------------|------------------|
| Viande | ⁴⁰ K | | 83,9 ± 11,2 | 109,9 ± 11,6 |
| | ⁵⁴ Mn | | < 0,16 | < 0,23 |
| | ⁶⁰ Co | | < 0,15 | < 0,24 |
| | ¹⁰⁶ Ru | | < 1,26 | < 1,61 |
| | ^{110m} Ag | | < 0,17 | < 0,32 |
| | ¹²⁴ Sb | | < 0,78 | < 0,67 |
| | ¹²⁵ Sb | | < 0,38 | < 0,55 |
| | ¹³⁴ Cs | | < 0,13 | < 0,19 |
| | ¹³⁷ Cs | | < 0,15 | 1,75 ± 0,32 |
| | ³ H (Bq/L) | | < 4,8 | nm |

Les analyses réalisées sur deux prélèvements de viande (*Tableau IV.20*) indiquent des activités en potassium 40 comprises entre 83,9 Bq/kg frais (bœuf à proximité de Civaux) et 109,9 Bq/kg frais (sanglier à proximité de Chooz). La viande de sanglier prélevée à proximité de Chooz a révélé la présence de traces de césium 137 (1,75 ± 0,32 Bq/kg frais) imputables aux retombées atmosphériques passées (accident de Tchernobyl notamment). Les activités des autres radionucléides artificiels sont restées inférieures aux limites de détection.

* Sauf indication contraire
nm : non mesuré

COMPARTIMENT AQUATIQUE CONTINENTAL

Eaux de surface

Le Tableau IV.21 récapitule les niveaux minimum et maximum d'activité en tritium observés dans les eaux prélevées en aval hydraulique immédiat de chaque CNPE.

TABLEAU IV.21 Activités en ^3H (Bq/L) mesurées dans les eaux prélevées en 2009 en aval et en amont des CNPE.

| | CNPE | Activité ^3H minimale | Activité ^3H maximale |
|-----------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Eaux de surface | Blayais | 4,7 | 45 |
| | Bugey | 6,4 | 20 |
| | Belleville | 4,8 | 27 |
| | Chinon | 4,6 | 41 |
| | Chooz | 4,6 | 28 |
| | Civaux | 4,9 | 49 |
| | Creys | 4,4 | 4,7 |
| | Cruas | 6,5 | 19 |
| | Cattenom | 4,6 | 35 |
| | Dampierre | 4,6 | 40 |
| | Fessenheim | 4,3 | 7,4 |
| | Golfech | 4,5 | 21 |
| | Nogent | 15 | 62 |
| | Saint-Laurent | 4,6 | 35 |
| | Saint-Alban | 4,6 | 11 |
| Tricastin | 5,1 | 11 | |

CNPE du bassin versant de la Loire

Aucune activité anormale alpha global ou bêta global n'a été décelée dans les eaux de surface prélevées en amont et en aval des CNPE du bassin versant de la Loire (Tableau IV.22).

TABLEAU IV.22 Activités moyennes (Bq/L) mesurées dans les eaux prélevées en 2009 en aval des CNPE de la Loire.

| | CNPE | Activité | Activité |
|-----------------|---------------|--------------|---------------------|
| Eaux de surface | Belleville | ^3H | $12,47 \pm 0,73$ |
| | | Alpha global | $0,022 \pm 0,0037$ |
| | | Bêta global | $0,135 \pm 0,019$ |
| | Chinon | ^3H | $13,32 \pm 0,70$ |
| | | Alpha global | $0,0269 \pm 0,0042$ |
| | | Bêta global | $0,134 \pm 0,019$ |
| | Civaux | ^3H | $15,28 \pm 0,76$ |
| | | Alpha global | $0,0099 \pm 0,0022$ |
| | | Bêta global | $0,114 \pm 0,021$ |
| | Dampierre | ^3H | $18,94 \pm 0,86$ |
| | | Alpha global | $0,0196 \pm 0,0038$ |
| | | Bêta global | $0,138 \pm 0,024$ |
| | Saint-Laurent | ^3H | $16,04 \pm 0,79$ |
| | | Alpha global | $0,0222 \pm 0,0037$ |
| | | Bêta global | $0,091 \pm 0,019$ |

Excepté le tritium, dont les niveaux mesurés en aval des CNPE sont à mettre en relation avec les rejets autorisés des installations (Figure IV.15), aucun radio-nucléide d'origine artificielle n'a été détecté en 2009.

Le tritium rejeté par les quatre CNPE dans la Loire y est détectable en quasi-permanence. Ces CNPE rejettent annuellement de l'ordre de 160 TBq en tritium sous forme liquide (représentant 17 % des rejets liquides en tritium du parc EDF). La Loire offre un faible coefficient de dilution des rejets, du fait de son débit moyen irrégulier et faible. À titre indicatif, le débit moyen annuel de la Loire à Langeais en aval de Chinon s'élève globalement à 300 m³/s, à comparer à celui du Rhône, de l'ordre de 1 500 m³/s à Viviers, en Ardèche.

Sur la Loire, le CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux coordonne les rejets de l'ensemble des CNPE du fleuve. Sauf dérogation, deux rejets de cuve ne peuvent être réalisés simultanément.

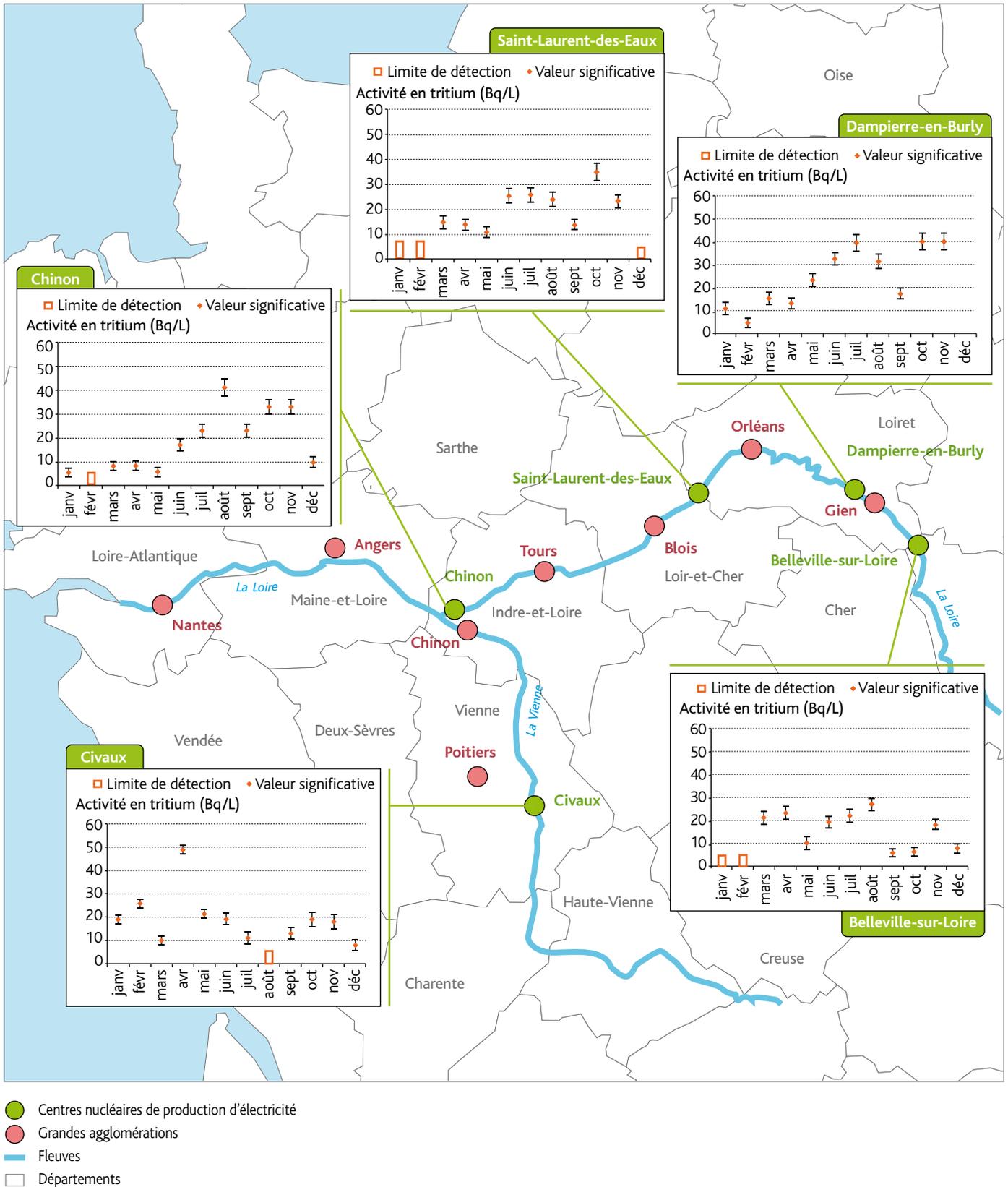


FIGURE IV.15 Implantation des CNPE du bassin versant de la Loire avec représentation graphique de l'activité en tritium dans l'eau de la Loire prélevée en 2009 en aval des CNPE (Bq/L).

CNPE de l'est de la France :
Cattenom, Chooz et Fessenheim

En 2009, aucune activité anormale alpha global ou bêta global n'a été décelée dans les eaux de surface prélevées en amont et en aval des CNPE de Cattenom, Chooz et Fessenheim (Tableau IV.23).

À proximité de ces CNPE, aucun radionucléide artificiel autre que le tritium n'a été mis en évidence. Les concentrations de ce radionucléide, mesurées en aval du CNPE de Cattenom (activité maximale de $35 \pm 3,5$ Bq/L), Chooz (activité maximale de 28 ± 3 Bq/L) et Fessenheim (activité maximale de $6,0 \pm 2,4$ Bq/L), sont à mettre en relation avec les rejets liquides de ces installations.

TABLEAU IV.23 Activités moyennes (Bq/L) mesurées dans les eaux prélevées en 2009 en amont et en aval des CNPE de l'est de la France.

| | | Élément | Activité (Bq/L) |
|-----------------|------------------|----------------|-----------------|
| Eaux de surface | Cattenom aval | ³ H | 23,70 ± 0,86 |
| | | Alpha global | 0,0301 ± 0,0067 |
| | | Bêta global | 0,199 ± 0,023 |
| | Cattenom amont | ³ H | < 4,49 |
| | | Alpha global | 0,0191 ± 0,0065 |
| | | Bêta global | 0,271 ± 0,045 |
| | Chooz aval | ³ H | 15,86 ± 0,73 |
| | | Alpha global | 0,0122 ± 0,0028 |
| | | Bêta global | 0,118 ± 0,022 |
| | Chooz amont | ³ H | < 4,69 |
| | | Alpha global | 0,0101 ± 0,0025 |
| | | Bêta global | 0,105 ± 0,020 |
| | Fessenheim amont | ³ H | 4,92 ± 0,72 |
| | | Alpha global | 0,0184 ± 0,0034 |
| | | Bêta global | 0,0742 ± 0,018 |
| | Fessenheim aval | ³ H | 5,05 ± 0,70 |
| | | Alpha global | 0,0204 ± 0,0036 |
| | | Bêta global | 0,079 ± 0,018 |

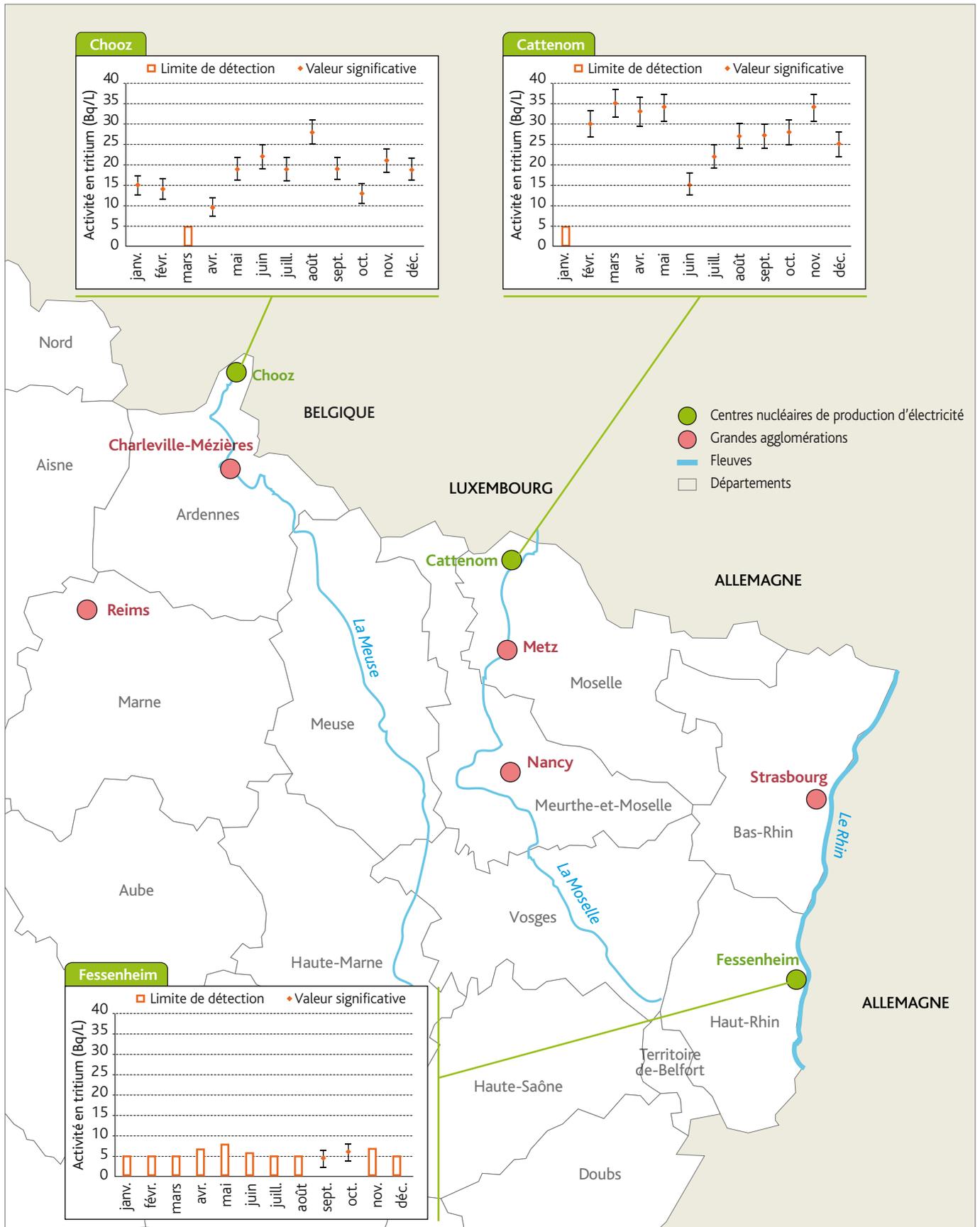


FIGURE IV.16 Implantation des CNPE de l'est de la France et représentation graphique de l'activité en tritium (Bq/L) dans l'eau du Rhin, de la Moselle et de la Meuse prélevée en 2009.

CNPE du bassin versant de la Garonne

Suite au changement d'implantation de l'hydrocol-lecteur IRSN courant 2005 en aval du CNPE du Blayais, les prélèvements ont été interrompus en 2006 et ont repris en septembre 2007. Comme pour les CNPE du littoral de la Manche, les prélèvements d'eau sont désormais effectués dans l'ouvrage de dilution des rejets du CNPE. La dilution des rejets est donc moindre en ce point de prélèvement que dans le cas des CNPE fluviaux où le prélèvement est réalisé dans le cours d'eau à un niveau où le mélange est supposé homogène.

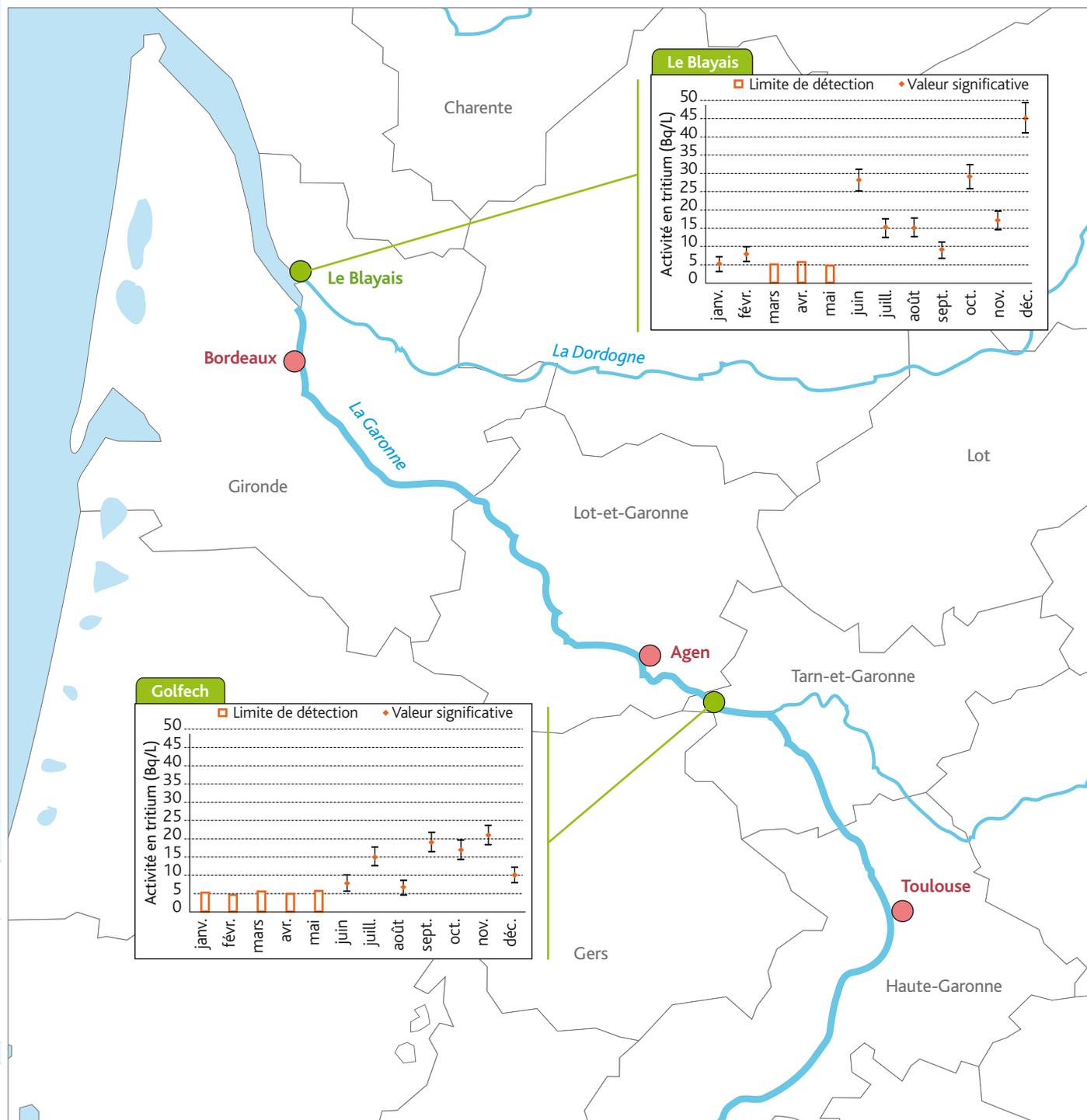
En 2009, aucune activité anormale alpha global ou bêta global n'a été décelée dans les eaux de surface prélevées en amont et en aval des CNPE du Blayais et de Golfech (Tableau IV.24).

TABLEAU IV.24 Activités moyennes (Bq/L) mesurées dans les eaux de surface prélevées en 2009 autour des CNPE du Blayais et de Golfech.

| | CNPE | Élément | Activité (Bq/L) |
|----------------|---------|--------------|-----------------|
| Eau de surface | Blayais | Tritium | 12,34 ± 0,73 |
| | | Alpha global | 0,043 ± 0,015 |
| | | Bêta global | 0,86 ± 0,14 |
| | Golfech | Tritium | 9,75 ± 0,71 |
| | | Alpha global | 0,0197 ± 0,0035 |
| | | Bêta global | 0,093 ± 0,021 |

Les concentrations mesurées des eaux prélevées en aval de ces CNPE ne mettent pas en évidence d'évolution par rapport aux années antérieures, et confirment la présence de tritium (activités maximales de 45 ± 4,1 Bq/L au Blayais et de 21 ± 2,7 Bq/L à Golfech) due aux rejets liquides autorisés de ces installations (Figure IV.17).

Aucun radionucléide artificiel autre que le tritium n'a été détecté au niveau de ces points de prélèvement.



- Centres nucléaires de production d'électricité
- Grandes agglomérations
- Fleuves
- Départements

FIGURE IV.17 Implantation des CNPE du bassin versant de la Garonne et représentation graphique de l'activité en tritium dans l'eau (Bq/L) prélevée en 2009.

CNPE de la vallée du Rhône

En 2009, aucune activité anormale alpha global ou bêta global n'a été décelée dans les eaux de surface prélevées en aval des CNPE du Rhône (Tableau IV.25).

TABLEAU IV.25 Activités moyennes (Bq/L) mesurées dans les eaux de surface prélevées en 2009 en aval des CNPE de la vallée du Rhône.

| | | CNPE | Élément | Activité (Bq/L) |
|----------------|-------------|------|--------------|-----------------|
| Eau de surface | Bugey | | Tritium | 11,95 ± 0,7 |
| | | | Alpha global | 0,033 ± 0,0052 |
| | | | Bêta global | 0,08 ± 0,02 |
| | Creys | | Tritium | < 4,56 |
| | | | Alpha global | 0,031 ± 0,0047 |
| | | | Bêta global | 0,083 ± 0,019 |
| | Cruas | | Tritium | 10,6 ± 0,7 |
| | | | Alpha global | 0,0252 ± 0,0046 |
| | | | Bêta global | 0,094 ± 0,021 |
| | Saint-Alban | | Tritium | 6,41 ± 0,63 |
| | | | Alpha global | 0,0221 ± 0,0039 |
| | | | Bêta global | 0,082 ± 0,019 |
| | Tricastin | | Tritium | 7,22 ± 0,63 |
| | | | Alpha global | 0,0288 ± 0,0046 |
| | | | Bêta global | 0,085 ± 0,019 |

Comme dans les années antérieures, les analyses réalisées sur les eaux prélevées en aval des CNPE de Cruas et Bugey ont révélé la présence régulière de tritium (activité maximale respectivement de $20 \pm 2,8$ Bq/L au Bugey et $19 \pm 2,7$ Bq/L à Cruas), due aux rejets liquides autorisés de ces CNPE (Figure IV.18).

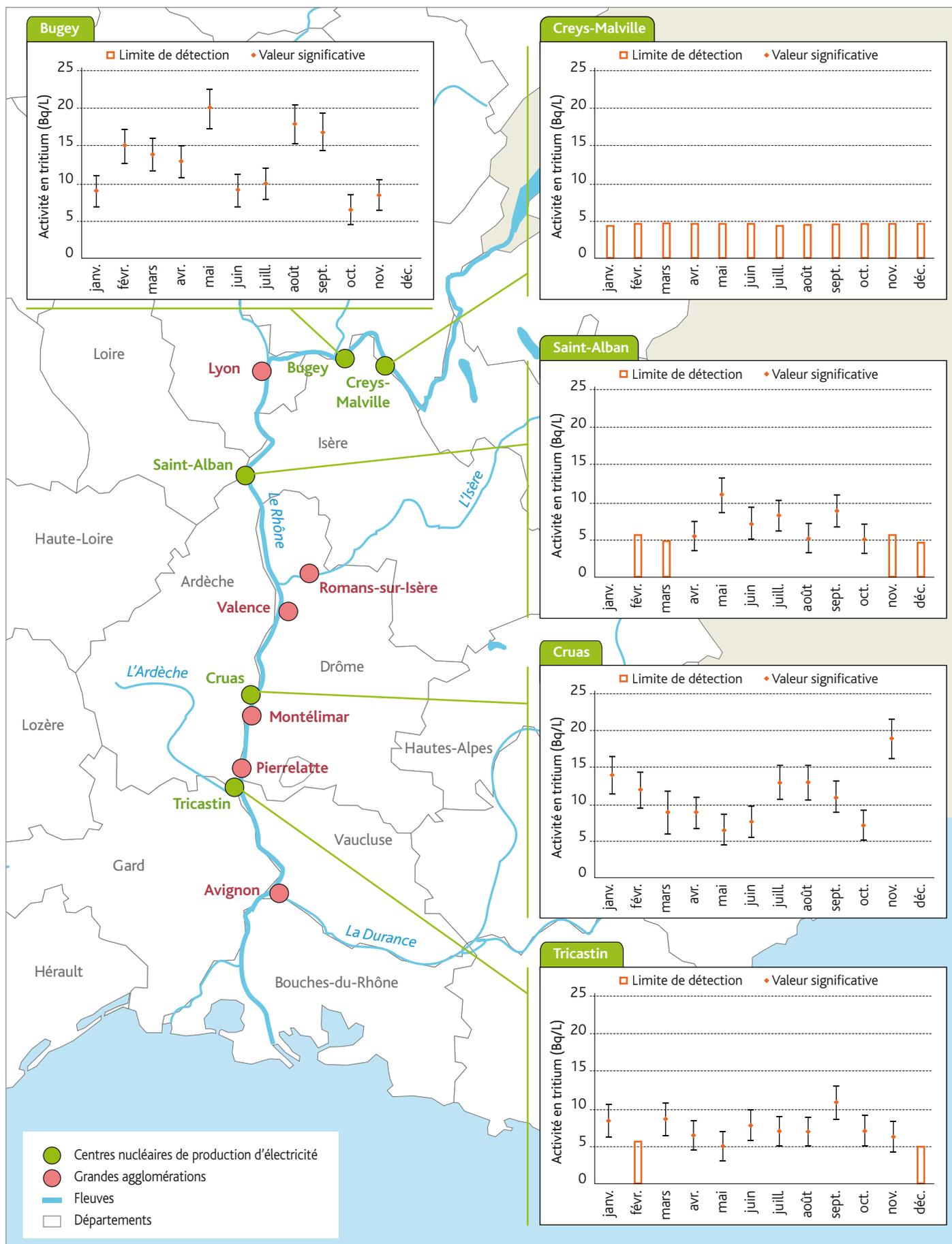


FIGURE IV.18 Implantation des CNPE du bassin versant du Rhône et représentation graphique de l'activité en tritium dans l'eau du Rhône (Bq/L) prélevée en 2009.

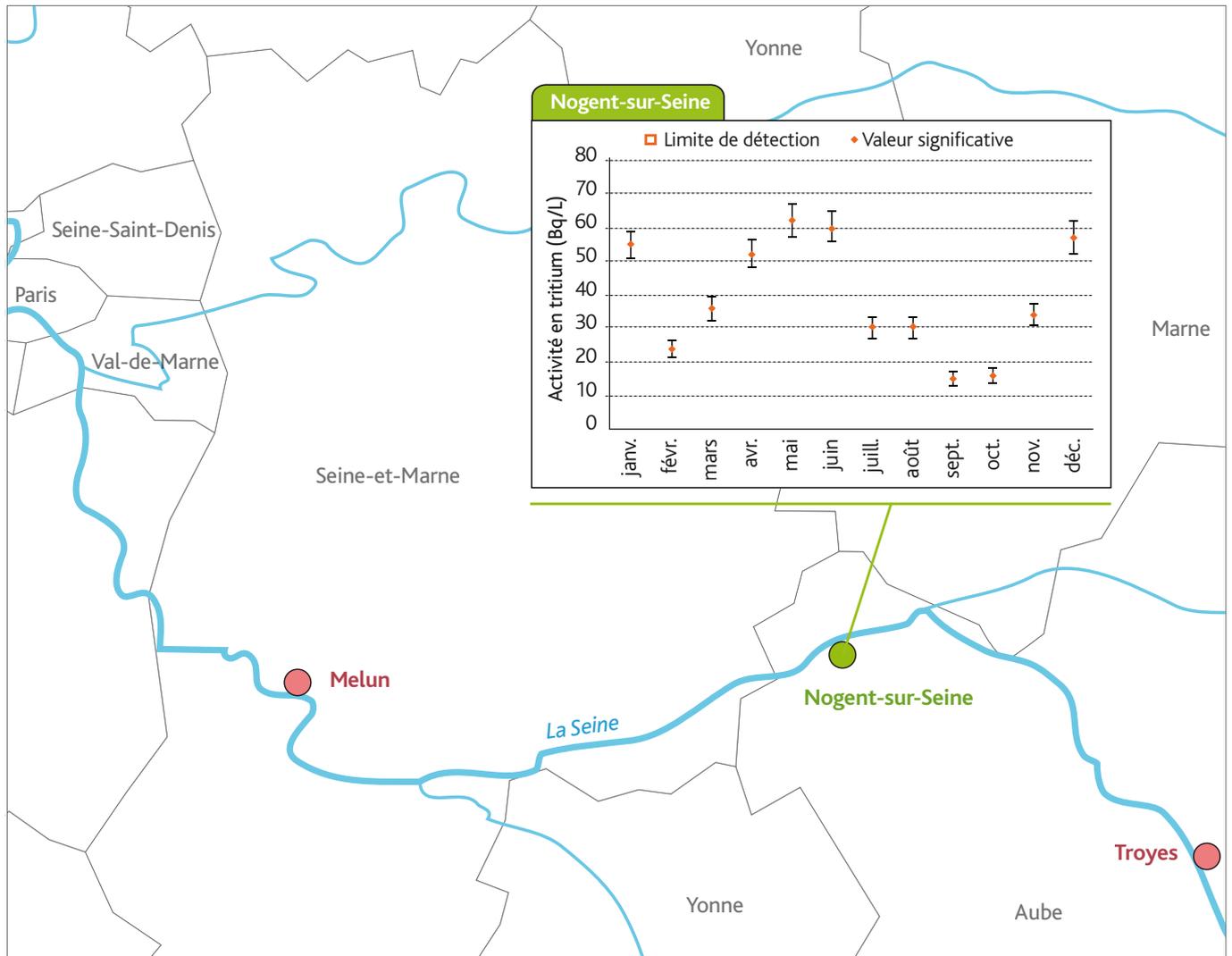
CNPE de Nogent-sur-Seine

En 2009, aucune activité anormale alpha global ou bêta global n'a été décelée dans les eaux de surface prélevées en amont et en aval du CNPE de Nogent-sur-Seine (Tableau IV.26).

Les analyses réalisées sur les eaux de la Seine prélevées en aval du CNPE ont mis en évidence la présence de tritium (activité maximale de 62 ± 5 Bq/L) à des concentrations comparables aux années antérieures. Ces activités sont en relation avec les rejets liquides autorisés de l'installation (Figure IV.19). En dehors du tritium, aucun autre radionucléide artificiel n'a été mis en évidence.

TABLEAU IV.26 Activités moyennes (Bq/L) mesurées dans les eaux de surface prélevées en 2009 en aval des CNPE de Nogent-sur-Seine.

| | CNPE | Élément | Activité (Bq/L) |
|----------------|------------------|--------------|--------------------|
| Eau de surface | Nogent-sur-Seine | Tritium | $31,25 \pm 0,99$ |
| | | Alpha global | $0,011 \pm 0,0027$ |
| | | Bêta global | $0,092 \pm 0,018$ |



- Centres nucléaires de production d'électricité
- Grandes agglomérations
- Fleuves
- Départements

FIGURE IV.19 Implantation du CNPE de Nogent-sur-Seine et représentation graphique de l'activité en tritium dans l'eau de la Seine (Bq/L) en 2009.

Faune aquatique continentale

En 2009, ont été réalisées des analyses d'échantillons de faune aquatique continentale prélevée en aval de trois CNPE : Blayais, Golfech et Saint-Laurent-des-Eaux.

Outre la présence de potassium 40, présent naturellement (51 Bq/kg frais à 110 Bq/kg frais), les analyses ont révélé la présence, en faible quantité, de tritium (activité proche de la limite de détection) et surtout de carbone 14, imputables aux rejets chroniques autorisés des CNPE, notamment de Golfech et de Saint-Laurent-des-Eaux.

TABLEAU IV.27 Activités mesurées dans la chair de la faune aquatique continentale prélevée en 2009 à proximité des CNPE du Blayais, de Golfech et de Saint-Laurent-des-Eaux (Bq/kg frais)*.

| | Radionucléide | CNPE du Blayais | | | CNPE de Golfech | CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|-------------|-----------------|--------------------------------|
| | | Gambas | Palourdes | Mulets | Poissons | Cyprinidés |
| | | Saint-Vivien-de-Médoc | | Valeyrac | Montauban | Fontaines-en-Sologne |
| Faune aquatique | ⁴⁰ K | 110 ± 14 | 51 ± 8 | 85 ± 12 | 93 ± 11 | 80 ± 11 |
| | ¹⁰⁶ Ru | < 1,15 | < 1,04 | < 1,33 | < 1,77 | < 2,21 |
| | ^{110m} Ag | < 0,12 | < 0,11 | < 0,15 | < 0,20 | < 0,24 |
| | ¹²⁴ Sb | < 0,29 | < 0,28 | < 0,37 | < 1,15 | < 0,94 |
| | ¹²⁵ Sb | < 0,35 | < 0,29 | < 0,42 | < 0,46 | < 0,65 |
| | ¹³¹ I | < 0,81 | < 0,69 | < 1,44 | nm | nm |
| | ¹³⁴ Cs | < 0,12 | < 0,11 | < 0,14 | < 0,17 | < 0,22 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,14 | < 0,12 | < 0,16 | < 0,16 | < 0,24 |
| | ⁵⁴ Mn | < 0,13 | < 0,12 | < 0,15 | < 0,18 | < 0,24 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,13 | < 0,13 | < 0,16 | < 0,19 | < 0,26 |
| | ¹⁴ C (Bq/kg C) | nm | nm | nm | 715,5 ± 2,7 | 504,3 ± 2,0 |
| | ³ H lié | nm | nm | 0,31 ± 0,06 | nm | nm |
| | ³ H libre (Bq/L) | < 5,6 | nm | < 5,6 | < 4,6 | 6,5 ± 2,1 |

* Sauf indication contraire
nm : non mesuré

Compartment marin

Eaux collectés au niveau des hydrocollecteurs

Afin d'optimiser la dispersion des rejets d'effluents liquides en mer, les CNPE « marins » 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 palier 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 2009, seul le tritium a été détecté. Les activités moyennes mensuelles sont présentées ci-après (Figure IV.20).

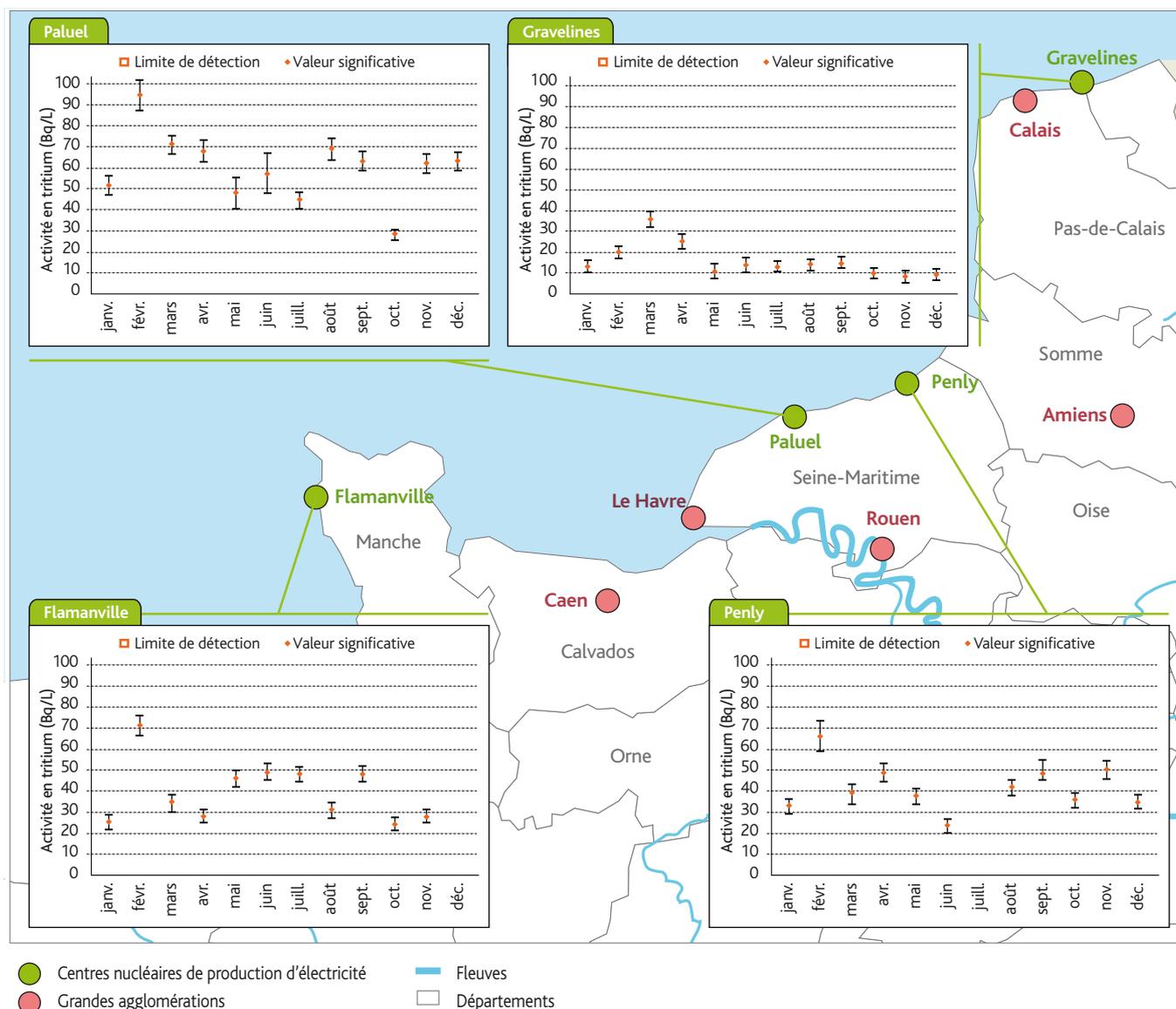


FIGURE IV.20

Implantation des CNPE sur le littoral de la Manche et de la mer du Nord avec représentation graphique de l'activité en tritium (Bq/L) dans l'eau de mer prélevée à proximité immédiate des CNPE marins.

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. Les MES sont collectées après décantation au niveau de l'hydrocollecteur placé dans le cours d'eau en aval du point de rejet des effluents liquides des CNPE. Les analyses sont réalisées sur les mélanges bimestriels.

En 2009, des niveaux très faibles de radioactivité attribuables directement aux rejets autorisés des CNPE ont été relevés uniquement et ponctuellement en aval hydraulique des CNPE de Bugey, Civaux, Cruas, Cattenom, Dampierre, Gravelines, Nogent, Paluel, Penly, Saint-Alban et Tricastin. Ces résultats s'expliquent par le fait que les moyens de traitement des effluents liquides utilisés par les exploitants EDF (évaporateur, déminéralisateur...) permettent des rejets à des niveaux d'activité volumique très faibles pour ces radionucléides, généralement inférieurs aux limites de détection. Lors d'aléas d'exploitation ou d'opérations

particulières, des rejets plus importants dont l'activité volumique est supérieure aux limites de détection peuvent être observés, tout en restant inférieurs aux autorisations réglementaires de rejets en vigueur.

Les résultats obtenus pour l'ensemble des points de collecte des cours d'eau du territoire sont présentés sur la Figure IV.21.

En ce qui concerne les émetteurs gamma d'origine artificielle, un marquage résiduel en césium 137 est observé dans chaque cours d'eau. Les concentrations moyennes mesurées, qui ne montrent pas de différence notable avec celles enregistrées les années antérieures, sont en relation avec les retombées atmosphériques passées liées principalement aux essais militaires et à l'accident de Tchernobyl.

Les principaux produits détectés, dus aux rejets des installations, sont ⁶⁰Co et ⁵⁴Mn (Figure IV.21). Ce sont des produits d'activation des matériaux constitutifs des installations (béton ou acier), soumis à des irradiations neutroniques.

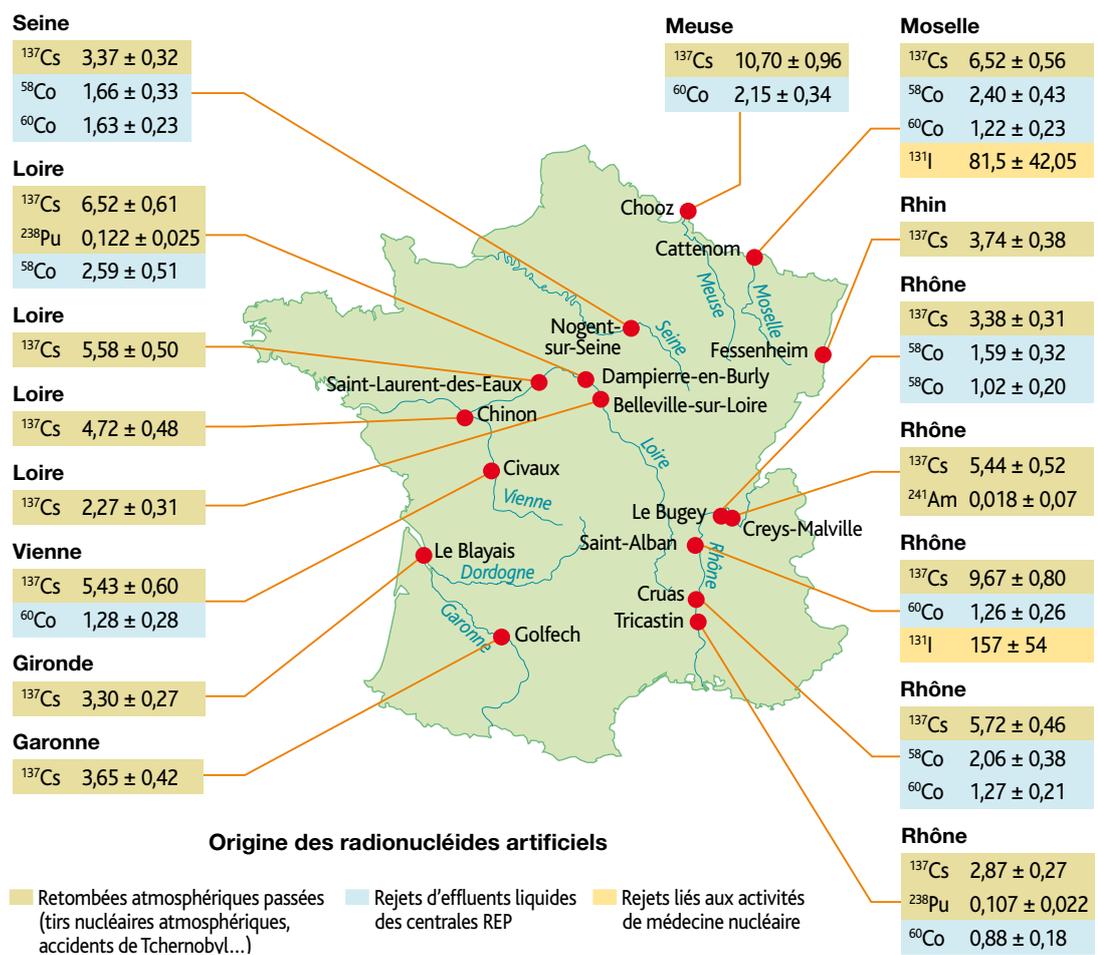


FIGURE IV.21 Moyenne des activités massiques observées pour l'ensemble des points de collecte des cours d'eau du territoire (valeurs en Bq/kg sec).

Faune aquatique marine

Les prélèvements de poissons réalisés à proximité du CNPE de Flamanville n'ont révélé aucune activité au-dessus des limites de détection en dehors du potassium 40 d'origine naturelle (82 Bq/kg frais). Les mollusques prélevés à Gravelines présentent des activités analogues à celles prélevées à Wimereux (^{40}K : 65,9 Bq/kg frais) et des traces de radionucléides artificiels provenant des rejets des usines de retraitement (^{241}Am) ou des retombées passées des tirs aériens ($^{239+240}\text{Pu}$). Les activités des autres radionucléides mesurés sont inférieures aux limites de détection.

TABLEAU IV.28 Activités mesurées dans la faune aquatique prélevée en 2009 à proximité des CNPE de Flamanville et de Gravelines (Bq/kg frais)*.

| | | CNPE de Flamanville Roussette Treauville | CNPE de Gravelines Moules OYE |
|--------------------|--|--|-------------------------------------|
| Poissons et moules | ^{40}K | 82 ± 10 | 65,9 ± 7,2 |
| | ^{60}Co | < 0,15 | < 0,06 |
| | ^{106}Ru | < 1,38 | < 0,60 |
| | ^{129}I | nm | < 0,28 |
| | ^{137}Cs | < 0,14 | < 0,05 |
| | Autres émetteurs gamma (^{54}Mn , ^{58}Co , ^{125}Sb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{134}Cs ...) | < 0,37 | < 0,16 |
| | ^{241}Am | < 0,003 | 0,004 ± 0,001 0,001 |
| | ^{238}Pu | < 0,003 | < 0,001 |
| | $^{239+240}\text{Pu}$ | < 0,003 | 0,0016 ± 0,0006 |
| | ^3H (Bq/L) | < 5,3 | nm |

* Sauf indication contraire
nm : non mesuré

IV.5 LA SURVEILLANCE DES INDUSTRIES SITUÉES EN AVAL DANS LE CYCLE DU COMBUSTIBLE

L'industrie de l'aval du cycle reçoit le combustible déchargé des réacteurs. Le combustible irradié est devenu beaucoup plus radioactif que l'uranium naturel, même après un certain temps de refroidissement dans les piscines. L'objectif de l'industrie de l'aval est le traitement du combustible usé. En France, on réalise d'une part la séparation et la purification de l'uranium et du plutonium, d'autre part le conditionnement final des déchets ultimes, sous forme vitrifiée pour les produits de fission, et dans des conteneurs de déchets compactés ou immobilisés dans du ciment pour les éléments de structures des assemblages combustibles.

Ce cycle a été plus récemment complété par l'industrialisation du recyclage du plutonium, grâce à la mise en service d'ateliers de fabrication de combustible mixte (plutonium-uranium), dit MOX (mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium), permettant de réutiliser une partie du plutonium en tant que combustible dans les centrales.

SITE DE MARCOULE (30)

Depuis mars 2006, le CEA est l'exploitant du site de Marcoule, AREVA assurant l'assainissement, le démantèlement et le conditionnement des déchets des installations de l'ancienne usine de traitement des combustibles usés. Sur ce même site, plusieurs activités nucléaires sont réunies : production de combustible MOX (usine MELOX), programme expérimental pour la filière à neutrons rapides (réacteur Phénix arrêté en 2009) et études sur les déchets de haute activité (laboratoire Atalante). Les réacteurs Célestin qui assuraient la production de tritium pour les besoins de la Défense nationale ont été mis à l'arrêt en décembre 2009.

La surveillance de l'environnement proche du site de Marcoule a fait l'objet d'une révision en 2009. Elle comprend désormais, outre les dispositifs DTL et Téléray, des prélèvements d'aérosols, d'eaux de pluie prélevées sous les vents dominants, de laits, d'herbes et de productions végétales, d'eaux de surface, de végétaux aquatiques et de sédiments (Figure IV.22).

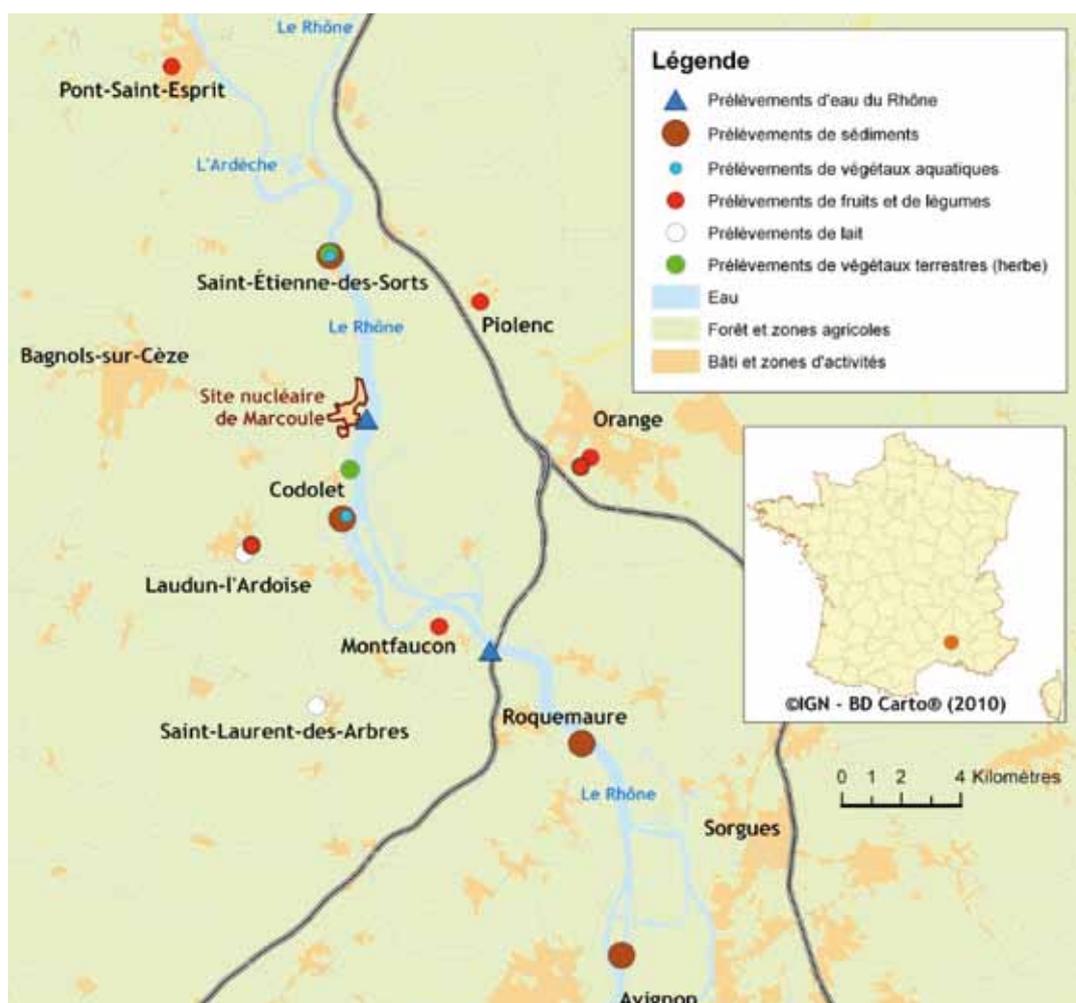


FIGURE IV.22 Plan de prélèvements dans l'environnement (compartiments terrestre et aquatique) du site de Marcoule.

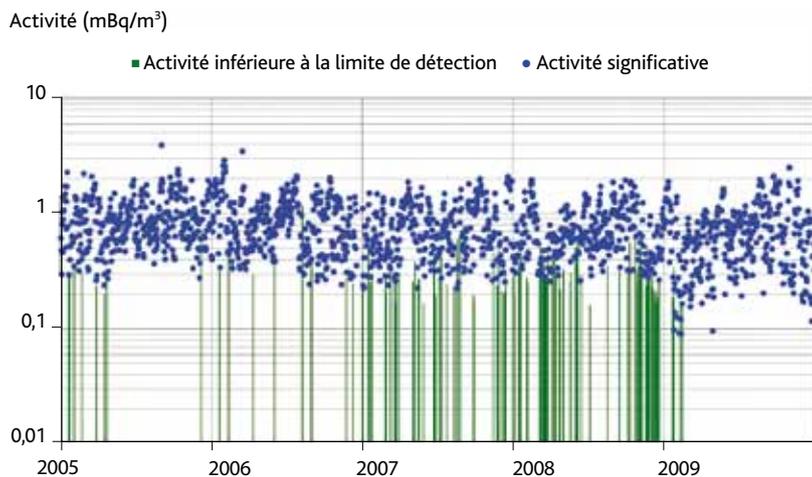


FIGURE IV.23 *Activité volumique bêta globale des aérosols dans l'environnement du site de Marcoule de 2005 à 2009.*

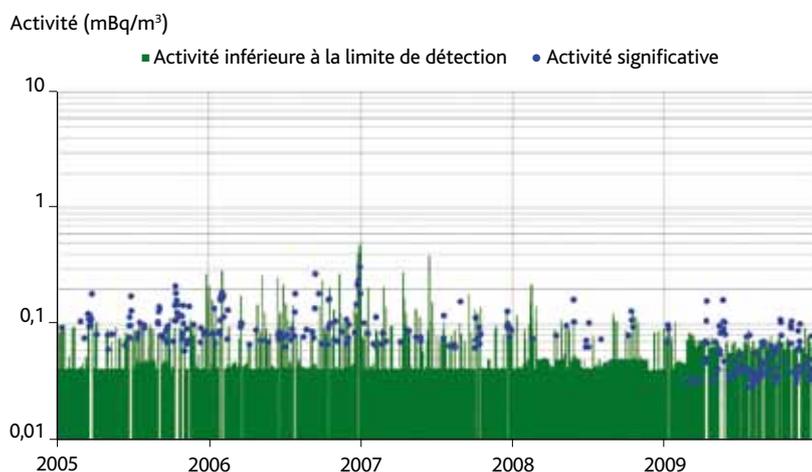


FIGURE IV.24 *Activité volumique alpha globale des aérosols dans l'environnement du site de Marcoule de 2005 à 2009.*

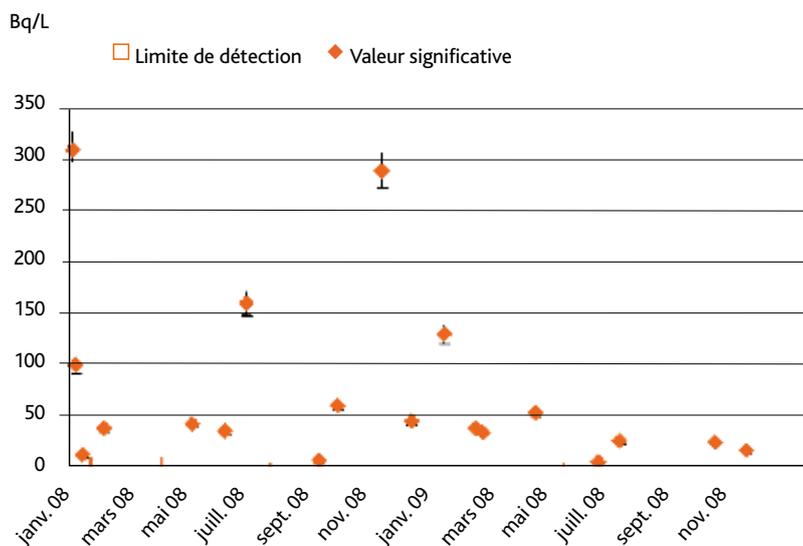


FIGURE IV.25 *Évolution de l'activité en ³H mesurée dans les eaux de pluie collectées en fonction des précipitations à une fréquence hebdomadaire au sud du site de Marcoule (Codolet) depuis 2008.*

Compartiment atmosphérique

Dosimétrie environnementale

Aucune activité gamma ambiante anormale n'a été enregistrée par les dosimètres thermoluminescents environnants ou par la balise Téléray implantée sous les vents dominants de l'installation.

Aérosols atmosphériques

Dans l'environnement du site de Marcoule, les suivis quotidiens des activités volumiques bêta global et alpha global des aérosols sont réalisés respectivement depuis 1976 et 1992. En 2009, les valeurs sont conformes aux valeurs habituellement mesurées (Figures IV.23 et IV.24).

En complément, les spectrométries gamma réalisées sur les regroupements hebdomadaires des prélèvements de filtres n'ont mis en évidence aucune activité anormale liée à la présence de radionucléides artificiels potentiellement rejetés par les installations du site de Marcoule, le tritium et les gaz ne pouvant par ailleurs pas être détectés par ce type d'analyse.

Eaux de pluie

Les résultats d'analyses des eaux de pluie collectées à la station de Codolet, située au sud du site de Marcoule, mettent en évidence la présence continue de tritium, due principalement aux rejets gazeux de quelques installations présentes sur ce site (réacteurs Célestin I et II et l'Atelier Tritium). Les activités atteignent au maximum $130,0 \pm 9,1$ Bq/L en 2009 (Figure IV.25).

Compartiment terrestre

Végétaux terrestres et productions végétales

Deux prélèvements semestriels d'herbes sont effectués à proximité du site, au nord et au sud. En complément, six fruits et légumes cultivés dans un périmètre de 10 km autour du site ont été analysés en 2009 (Tableau IV.29).

Les résultats indiquent, comme pour les végétaux prélevés dans des zones considérées hors influence potentielle des rejets du site, que l'activité majeure est celle du potassium 40.

Une activité très faible en césium 137 (3,6 Bq/kg sec) est identifiée dans un des deux prélèvements d'herbe (Codolet), et en strontium 90 dans la salade prélevée à Montfaucon. Pour ces deux radionucléides, il est impossible de discriminer la part relative aux retombées passées sur l'ensemble du territoire français (voir Chapitre II) de celle des rejets potentiels des installations du site.

L'activité en 3H libre mesurée dans la salade de Montfaucon, et dans une moindre mesure celle mesurée dans l'herbe prélevée à Saint-Étienne-des-Sorts, sont en revanche supérieures aux valeurs moyennes enregistrées sur le territoire, généralement inférieures à 4,6 Bq/L. Elles sont imputables aux rejets gazeux du site de Marcoule.

Les activités des autres radionucléides artificiels sont inférieures aux limites de détection.

Le lait prélevé en deux points dans l'environnement proche du site de Marcoule ne présente aucune activité artificielle supérieure aux limites de détections (Tableau IV.30).

TABLEAU IV.30 Activités moyennes mesurées dans le lait de vache prélevé en 2009 dans l'environnement du site nucléaire du Tricastin (Bq/L).

| | | Grignan | Châteauneuf-du-Pape |
|------|-------------------|------------|---------------------|
| Lait | ⁴⁰ K | 63,2 ± 3,0 | 61,4 ± 3,1 |
| | ¹⁰⁶ Ru | < 1,69 | < 1,74 |
| | ¹³⁴ Cs | < 0,18 | < 0,17 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,19 | < 0,21 |
| | ⁹⁰ Sr | < 0,04 | < 0,03 |
| | ³ H | < 5,06 | < 6,51 |

TABLEAU IV.29 Activités moyennes mesurées dans les végétaux et productions végétales prélevées en 2009 à proximité du site de Marcoule.

| | | Herbes | | Salade | Chou | Fraise | Salade | Pomme | Poire |
|---------------------------------|--|-------------------------|-----------|--------------|---------|--------|----------|---------|-------------------|
| | | Bq/kg sec* | | Bq/kg frais* | | | | | |
| | | Saint-Étienne-des-Sorts | Codolet | Montfaucon | Laudun | Orange | Orange | Piolenc | Pont-Saint-Esprit |
| Herbes et productions végétales | ⁴⁰ K | 858 ± 83 | 65 ± 6 | 167 ± 19 | 87 ± 11 | 59 ± 6 | 120 ± 12 | 43 ± 5 | 33 ± 4 |
| | ⁶⁰ Co | < 1,8 | < 0,016 | < 0,08 | < 0,06 | < 0,03 | < 0,05 | < 0,09 | 0,03 |
| | ¹³⁷ Cs | < 1,70 | 3,6 ± 1,3 | < 0,07 | < 0,05 | < 0,02 | < 0,04 | < 0,08 | < 0,03 |
| | Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ¹⁰⁶ Ru, ¹²⁵ Sb, ^{110m} Ag, ¹³⁴ Cs...) | < 11,9 | < 0,026 | < 0,42 | < 0,51 | < 0,24 | < 0,36 | < 0,64 | < 0,28 |
| | ⁹⁰ Sr | < 1,16 | < 0,029 | 0,09 ± 0,01 | nm | nm | nm | nm | nm |
| | ²⁴¹ Am | < 0,02 | nm | < 0,003 | nm | nm | nm | nm | nm |
| | ²³⁸ Pu | < 0,02 | nm | < 0,001 | nm | nm | nm | nm | nm |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | < 0,02 | nm | < 0,001 | nm | nm | nm | nm | nm |
| | ³ H libre (Bq/L) | 6,3 ± 1,4 | 5,1 ± 2,0 | 12,0 ± 2,3 | nm | nm | nm | nm | nm |

* Sauf indication contraire nm : non mesuré

Compartiment aquatique continental

Eaux de surface

Les analyses réalisées dans les eaux du Rhône prélevées mensuellement en amont du site de Marcoule (Tableau IV.31) mettent en évidence la présence en faible quantité de tritium (activité maximale de $15 \pm 2,4$ Bq/L), due vraisemblablement aux rejets liquides des installations nucléaires situées en amont sur le Rhône. Les niveaux d'activité mesurés en aval du site ne témoignent pas d'une influence des rejets de ce dernier. Le strontium 90 a été détecté en 2009 à des activités proches de la limite de détection, comme en 2008.

TABLEAU IV.31 Activités mesurées dans les eaux prélevées en 2009 dans le Rhône, en amont et en aval du site de Marcoule (Bq/L).

| | Radio-nucléide | Amont du site | Aval du site |
|-----|------------------|---------------------|-----------------------|
| Eau | α global | $0,0238 \pm 0,0029$ | $0,0247 \pm 0,0029$ |
| | β global | $0,092 \pm 0,012$ | $0,0984 \pm 0,0061$ |
| | ^3H | $9,54 \pm 0,65$ | $8,69 \pm 0,64$ |
| | ^{90}Sr | nm | $0,00451 \pm 0,00066$ |

Sédiments

Des échantillons de sédiment sont prélevés sur six stations disposées le long du Rhône, depuis Saint-Étienne-des-Sorts en amont, jusqu'à l'embouchure du Rhône à Port-Saint-Louis. Les principaux résultats sont présentés dans le Tableau IV.32.

TABLEAU IV.32 Activités moyennes mesurées dans les sédiments prélevés en 2009 en aval du site de Marcoule (Bq/kg sec).

| | Station de prélèvement | Radionucléide | | | | |
|-----------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| | | ^{137}Cs | ^{60}Co | ^{241}Am | ^{238}Pu | $^{239+240}\text{Pu}$ |
| Sédiments | Saint-Étienne-des-Sorts | $3,53 \pm 0,81$ | $< 0,60$ | $< 0,13$ | $< 0,30$ | $< 0,15$ |
| | Codolet | $26 \pm 4,2$ | $1,38 \pm 0,44$ | $0,63 \pm 0,21$ | $0,107 \pm 0,076$ | $0,79 \pm 0,20$ |
| | Roquemaure | $6,23 \pm 0,32$ | $0,772 \pm 0,095$ | $0,184 \pm 0,026$ | $0,114 \pm 0,017$ | $0,136 \pm 0,021$ |
| | Avignon | $15,2 \pm 2,8$ | $1,33 \pm 0,37$ | $0,15 \pm 0,08$ | $0,086 \pm 0,058$ | $0,194 \pm 0,081$ |
| | Port-Saint-Louis-du-Rhône | $7,4 \pm 1,7$ | $1,03 \pm 0,31$ | $< 0,16$ | $< 0,14$ | $0,127 \pm 0,085$ |

En amont du site de Marcoule (Saint-Étienne-des-Sorts), seul le ^{137}Cs est détecté dans les sédiments à une activité moyenne en 2009 de 3,53 Bq/kg sec. En aval, plusieurs radionucléides d'origine artificielle (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$) sont mis en évidence dans les sédiments. Le ^{137}Cs est mesuré systématiquement dans tous les échantillons, à des teneurs plus élevées que les autres radionucléides, principalement aux stations de Codolet (26 Bq/kg sec) et Avignon (15,2 Bq/kg sec). Si un léger marquage par les rejets du site, surtout passés, ne peut être exclu pour ce radionucléide, sa présence trouve son origine essentiellement dans les retombées atmosphériques passées. Des traces de transuraniens (principalement Pu 239 et 240) et de cobalt 60, liées principalement aux rejets passés de l'établissement de Marcoule, sont détectées jusqu'à l'embouchure du Rhône à la station de Port-Saint-Louis. Les sédiments les plus marqués en transuraniens sont ceux prélevés à Codolet (0,79 Bq/kg sec), station la plus proche de l'émissaire de rejets d'effluents liquides du site de Marcoule. Au-delà de cette station, les niveaux de radioactivité mesurés le long du Rhône deviennent homogènes et proches des limites de détection (Figure IV.26).

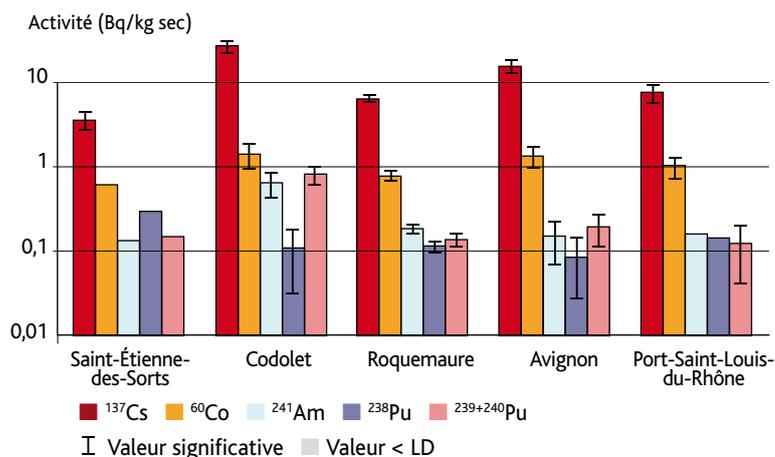


FIGURE IV.26 Évolution des niveaux de radioactivité artificielle (Bq/kg sec) en 2009 dans les sédiments du Rhône de l'amont du site de Marcoule à l'embouchure du Rhône.



FIGURE IV.27 Prélèvement de sédiment dans le Rhône à proximité du site de Marcoule.

Végétaux aquatiques

Deux prélèvements de végétaux aquatiques sont réalisés semestriellement en amont hydraulique du site de Marcoule (Saint-Étienne-des-Sorts) et en aval (Codolet). Outre la présence habituelle de potassium 40, les analyses indiquent la présence de traces de radionucléides d'origine artificielle comme le césium 137 décelé en amont comme en aval du site. Néanmoins, si ces traces s'expliquent essentiellement par les retombées atmosphériques des tirs passés et de l'accident de Tchernobyl, un léger marquage de l'aval ne peut être exclu pour ce radionucléide.

Le prélèvement en aval présente des traces d'activité en plutonium 238 et 239+240 légèrement supérieures à celles mesurées en amont, suggérant aussi un marquage par les rejets autorisés du site. Cette observation n'est pas transposable au tritium dont les activités sont identiques en amont et en aval du site.

TABLEAU IV.33 Activités (Bq/kg sec)* mesurées dans les végétaux aquatiques à proximité du site du Tricastin (potamots).

| | | Saint-Étienne-des-Sorts Amont du site | Codolet Aval du site |
|---------------------|--|--|-------------------------|
| Végétaux aquatiques | ⁴⁰ K | 756 ± 97 | 931 ± 128 |
| | ⁶⁰ Co | < 1,06 | < 2,87 |
| | ¹³⁷ Cs | 0,90 ± 0,43 | 3,75 ± 2,17 |
| | Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ¹⁰⁶ Ru, ¹²⁵ Sb, ^{110m} Ag, ¹³⁴ Cs...) | < 7,2 | < 18,6 |
| | ⁹⁰ Sr | 1,21 ± 0,20 | nm |
| | ²⁴¹ Am | < 0,03 | < 0,12 |
| | ²³⁸ Pu | < 0,02 | 0,016 ± 0,010 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 0,025 ± 0,012 | 0,083 ± 0,022 |
| | ³ H libre (Bq/L) | 4,5 ± 2,0 | 5,1 ± 2,6 |

* Sauf indication contraire nm : non mesuré

SITE DE LA HAGUE (50)



Légende

| | |
|---|---------------------------|
| ■ | Eau |
| ■ | Bâti et zones d'activités |
| ■ | Forêt et zones agricoles |
| ■ | Sable, gravier |
| ■ | Rocher, éboulis |

©IGN - BD Carto® (2010)

FIGURE IV.28 Carte de situation du site de La Hague.

Sauf indication particulière, le site de La Hague sera entendu ici comme l'ensemble formé par le centre AREVA-NC de La Hague, qui assure les opérations de traitement des combustibles usés, et le centre de stockage des déchets de la Manche (ANDRA).

Les rejets gazeux du site sont dominés par le krypton 85 (196 000 TBq en 2009), le tritium (47,4 TBq en 2009) et le carbone 14 (14,5 TBq en 2009). Les rejets liquides sont essentiellement représentés par le tritium (9 130 TBq en 2009) mais contiennent également en faible quantité un cocktail de radionucléides caractéristiques de la

filière nucléaire : produits de fission tels que le strontium 90, le ruthénium 106, les césiums 134 et 137, les iodes radioactifs et des transuraniens émetteurs alpha (^{241}Am et isotopes du plutonium notamment).

L'environnement proche du site fait l'objet d'une surveillance de l'atmosphère (DTL, Téléray, aérosols), des eaux de pluie et du lait de ferme prélevés sous les vents dominants, de l'eau et des sédiments de rivière, du sol, des végétaux terrestres, des eaux de mer et des sédiments marins, des céréales, de la faune et de la flore marines.

Compartment atmosphérique

Dosimétrie environnementale

Aucune activité gamma ambiante anormale n’a été enregistrée par les dosimètres thermoluminescents environnants ou par la balise Téléray implantée sous les vents dominants de l’installation.

Aérosols atmosphériques

Dans l’environnement du site de La Hague, les suivis quotidiens des activités volumiques bêta global et alpha global des aérosols sont réalisés respectivement depuis 1981 et 1992. En 2009, aucune augmentation de celles-ci n’a été constatée par rapport aux valeurs habituellement mesurées (Figures IV.29 et IV.30).

En complément du suivi de l’indice d’activité alpha et bêta, des spectrométries gamma réalisées sur les regroupements hebdomadaires des prélèvements de filtres effectués permettent de quantifier des radionucléides artificiels rejetés par les installations du site. Les résultats d’analyse n’ont mis en évidence aucune activité décelable dans l’environnement pour ces radionucléides (Tableau IV.34).

TABLEAU IV.34 Limites de détections (mBq/m³) des analyses de regroupements hebdomadaires de filtres prélevés autour du site de La Hague.

| | Radionucléide | Activité volumique |
|----------|--|--------------------|
| Aérosols | ⁵⁴ Mn, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs | < 0,06 |
| | ⁵⁸ Co | < 0,12 |
| | ⁶⁰ Co, ^{110m} Ag | < 0,07 |
| | ¹⁰⁶ Ru | < 0,48 |
| | ⁹⁵ Zr | < 0,20 |
| | ²⁴¹ Am | < 0,04 |

Il convient toutefois de préciser que la mesure des prélèvements d’aérosols ne permet pas de caractériser l’impact des rejets de tritium et de carbone 14, pour lesquels d’autres techniques de mesure doivent être mises en œuvre. Cela ne permet pas non plus d’estimer la quantité de certains gaz rares, en particulier le krypton 85, rejeté par l’usine (voir Focus page 114).

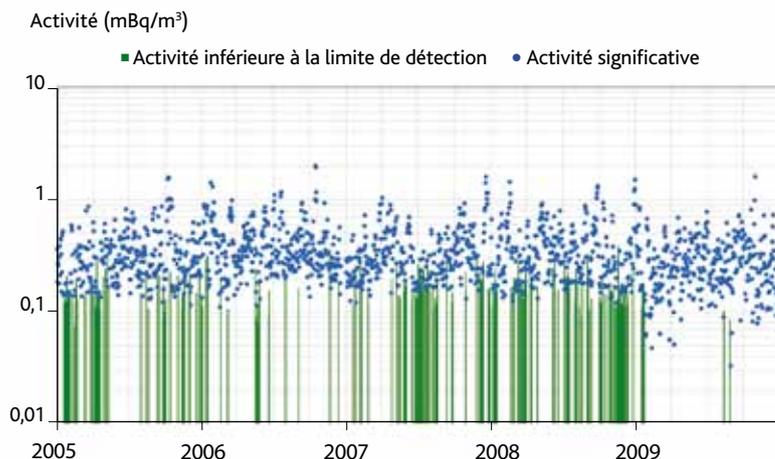


FIGURE IV.29 Activité volumique bêta globale des aérosols dans l’environnement du site de La Hague de 2005 à 2009.

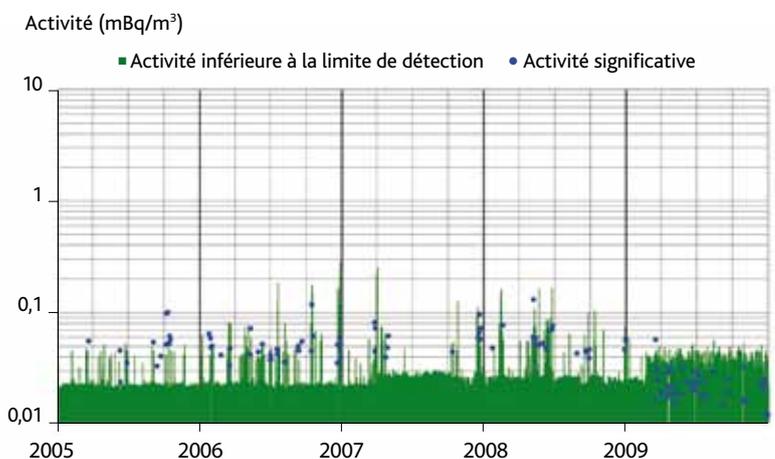
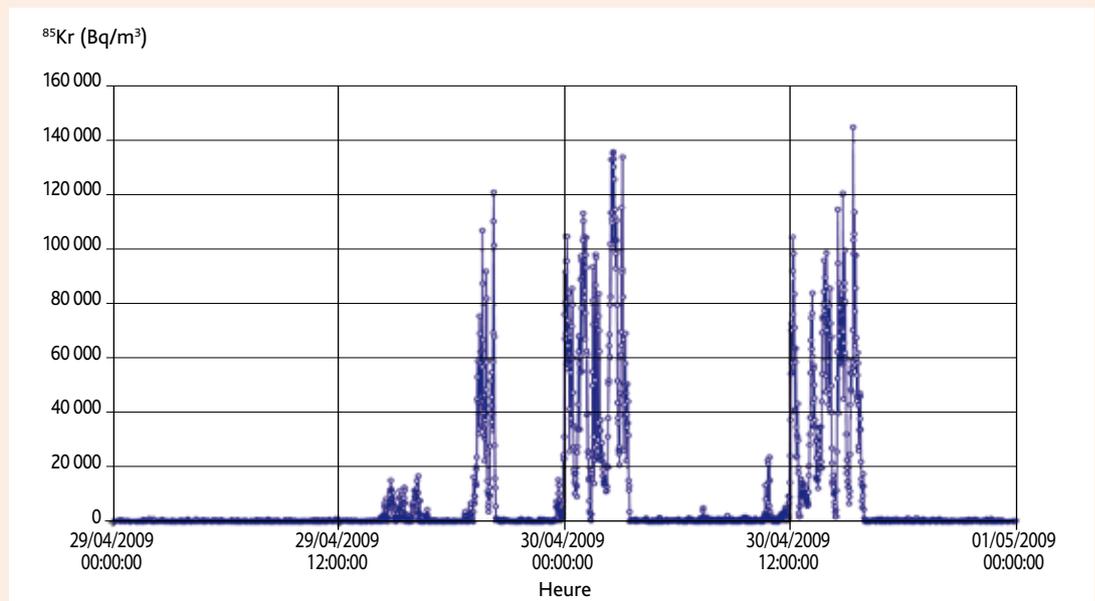


FIGURE IV.30 Activité volumique alpha globale des aérosols dans l’environnement du site de La Hague de 2005 à 2009.

Le krypton 85 émis par l'usine de traitement des combustibles usés : un outil pour l'étude de la dispersion atmosphérique des effluents gazeux

Depuis octobre 2006, le laboratoire de l'IRSN implanté dans le Cotentin réalise des mesures en continu de krypton 85 (^{85}Kr) dans l'air, sur un site atelier situé au nord de l'usine de traitement des combustibles usés AREVA-NC La Hague, à 2 kilomètres des deux cheminées de rejet. Le ^{85}Kr , isotope radioactif émetteur β - et γ de période radioactive de 10,7 ans, est un radionucléide naturel également produit dans les réacteurs nucléaires. Il a aussi été émis dans l'atmosphère lors des essais aériens d'armes nucléaires. À présent, il est relâché principalement par les usines de retraitement des combustibles nucléaires usés. Dans ses études, l'IRSN utilise le ^{85}Kr comme outil de quantification de la dispersion atmosphérique des effluents gazeux, à proximité de l'usine de La Hague qui le rejette de façon chronique en quantité. L'objectif est d'améliorer la

précision des modèles de calcul utilisés pour évaluer la dispersion des effluents gazeux rejetés dans l'environnement. Ces modèles manquent en effet actuellement de précision pour des rejets effectués à une certaine hauteur, comme c'est le cas de l'usine de La Hague, dont la hauteur des cheminées est de 100 m. Les activités volumiques en ^{85}Kr au niveau de l'atelier sont très variables car elles sont fortement modulées par le régime des vents et le rythme de cisailage des barres de combustible, opération à l'origine des rejets du krypton 85. Ainsi, lorsque le site atelier n'est pas sous l'influence des rejets de l'usine, les concentrations sont de l'ordre du Bq/m^3 alors que, dans le cas contraire, elles peuvent atteindre ponctuellement plusieurs dizaines de milliers de Bq/m^3 (Figure IV.31).



o : mesures intégrées sur 1 minute

FIGURE IV.31 Activité en ^{85}Kr dans l'air à l'atelier nord les 29 et 30 avril 2009.

Eaux de pluie

Les eaux de pluie sont prélevées en continu à Gréville et relevées à une fréquence hebdomadaire. Les mesures sont réalisées sur un mélange mensuel. En 2009, aucune activité en radionucléides artificiels n'a été mesurée au-dessus de nos limites de détection.

Compartiment terrestre

Végétaux terrestres

Des prélèvements de végétaux terrestres (herbe, pâturage, pommes et choux) sont réalisés sous les principaux vents dominants, à Herqueville et Beaumont-Hague, Omonville-la-Petite et Jobourg. Les principaux résultats sont présentés dans les tableaux suivants.

TABLEAU IV.35 Activités moyennes mesurées dans les végétaux terrestres et les productions végétales prélevés en 2009 autour du site de La Hague.

| | | Station | Beaumont-Hague | Herqueville | | Omonville-la-Petite | Jobourg |
|-----------------------|----------------------|-----------|----------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|
| Productions végétales | Radionucléide | Unité | Herbe | Herbe | Pâturage | Pâturage | Herbe |
| | ⁴⁰ K | Bq/kg sec | 732 ± 58 | 640 ± 30 | 574 ± 28 | 811 ± 110 | 760 ± 72 |
| | ⁹⁰ Sr | | 3,45 ± 0,38 | 4,44 ± 0,26 | 4,47 ± 0,19 | 3,72 ± 0,38 | nm |
| | ¹²⁹ I | | < 3,6 | 4,15 ± 0,85 | 2,34 ± 0,51 | nm | 5,7 ± 1,3 |
| | ¹³⁷ Cs | | < 1,1 | < 0,9 | < 0,99 | < 1,08 | 1,05 ± 0,38 |
| | ¹⁰⁶ Ru | nm | < 7,6 | < 8,3 | < 10,1 | < 8,9 | |
| | ³ H libre | Bq/L | nm | 24 ± 2,9 | 8,3 ± 1,4 | 5,4 ± 2,7 | nm |
| ¹⁴ C | Bq/kg C | 532 ± 110 | 774 ± 93 | 667 ± 50 | nm | 1280 ± 130 | |

| Omonville-la-Petite | | | | |
|-----------------------|----------------------|-------------|---------------|---------------|
| Productions végétales | Radionucléide | Unité | Pommes | Chou |
| | ⁴⁰ K | Bq/kg frais | 51,9 ± 6,8 | 84 ± 10 |
| | ⁹⁰ Sr | | 0,066 ± 0,008 | 0,493 ± 0,051 |
| | ¹³⁷ Cs | | < 0,085 | < 0,052 |
| | ³ H libre | Bq/L | 6,2 ± 2,1 | nm |
| ¹⁴ C | Bq/kg C | 292,7 ± 1,3 | nm | |

nm : non mesuré

La radioactivité d'origine naturelle observée dans les végétaux est majoritairement due au ⁴⁰K. Plusieurs radionucléides d'origine artificielle sont mesurés dans les végétaux : tritium, carbone 14, iode 129 et strontium 90.

Les concentrations en ¹⁴C mesurées aux stations d'Herqueville, Jobourg et Beaumont témoignent d'un marquage des végétaux terrestres lié aux rejets gazeux du site de La Hague. En 2009, les concentrations moyennes annuelles de ¹⁴C dans l'herbe s'échelonnent de 532 à 1 280 Bq/kg C. Ces valeurs sont nettement supérieures à la valeur de 242 Bq/kg C observée dans les zones non influencées par les rejets des installations. Comme constaté depuis plusieurs années, les valeurs maximales dans les végétaux terrestres sont atteintes entre mai et juillet et sont supérieures d'un facteur 2 à 4 par rapport à la moyenne annuelle (maximum de 1473 Bq/kg C mesuré à Herqueville en juin). Cette hausse s'explique à la fois par une augmentation de l'activité rejetée par les effluents de l'usine AREVA-NC de La Hague pendant cette période et surtout une période de photosynthèse maximale impliquant l'absorption de CO₂ atmosphérique potentiellement marqué au ¹⁴C.

Les concentrations mesurées en ⁹⁰Sr dans l'herbe sont comprises entre 3,45 et 4,47 Bq/kg sec, c'est-à-dire dans la gamme des valeurs mesurées dans les zones non influencées par les rejets industriels.

Enfin, l'herbe prélevée à Herqueville témoigne d'un léger marquage par les rejets du site avec une activité en tritium supérieure aux valeurs mesurées hors influence d'installation nucléaire.

Les activités des autres radionucléides sont restées inférieures aux limites de détection.

Céréales

Des prélèvements de blé sont réalisés lors de la récolte annuelle sur la commune de Digulleville. Les concentrations des émetteurs gamma hors potassium 40 sont restées inférieures aux limites de détection qui figurent dans le tableau suivant.

TABLEAU IV.36 Activités moyennes mesurées (Bq/kg frais) sur le blé à Digulleville en 2009.

| | | Radionucléide | Activité massique |
|-----|--|--|-------------------|
| Blé | | ⁴⁰ K | 119 ± 17 |
| | | ⁶⁰ Co | < 0,47 |
| | | ¹⁰⁶ Ru | < 5,05 |
| | | ¹²⁴ Sb | < 3,84 |
| | | ¹³⁷ Cs | < 0,45 |
| | | Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ¹²⁴ Sb, ^{110m} Ag, ¹³⁴ Cs...) | < 1,43 |
| | | ²⁴¹ Am | < 0,0011 |
| | | ²³⁸ Pu | < 0,0010 |
| | | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | < 0,0010 |

Lait

Des échantillons de lait de vache sont prélevés trimestriellement ou semestriellement dans une coopérative située à Sottevast et dans quatre fermes situées à Digulleville, Omonville-la-Rogue, Jobourg et Beaumont-Hague.

Parmi les radionucléides d'origine artificielle susceptibles d'être rejetés par le site, des traces d'¹²⁹I et de ³H imputables aux rejets du site de La Hague ont été observées sur quelques échantillons collectés en 2009.

L'iode 129 a été détecté régulièrement dans les échantillons prélevés sur la commune de Beaumont - Hague et ponctuellement dans ceux prélevés à la station de Omonville (une valeur significative pour cette commune en janvier 2009).

L'abaissement depuis 2008 de la limite de détection du tritium de 20 Bq/L à 5 Bq/L, a permis de mesurer une valeur significative de $8,1 \pm 1,9$ Bq/L au mois de juillet, pour le lait provenant de la station de Digulleville (mesure du tritium libre après lyophilisation).

Pour les autres radionucléides émetteurs gamma, les résultats sont comparables sur l'ensemble des stations et restent inférieurs aux limites de détection.

TABLEAU IV.37 Activités moyennes mesurées dans le lait de vache prélevé en 2009 dans l'environnement du site de La Hague (Bq/L).

| | Radionucléide | Sottevast | Beaumont - Hague | Digulleville | Omonville- la-Rogue | Jobourg |
|------|-------------------|------------|---------------------|--------------|------------------------|---------------|
| Lait | ⁴⁰ K | 51,2 ± 3,3 | 44,5 ± 2,0 | 48,6 ± 2,2 | 51,2 ± 2,7 | 46,4 ± 3,3 |
| | ³ H | nm | < 5,1 | 8,1 ± 1,9 | < 5,2 | < 5,2 |
| | ¹³¹ I | < 0,23 | < 0,32 | < 0,29 | < 0,26 | nm |
| | ¹²⁹ I | < 0,33 | 0,0210 ± 0,0065 | < 0,35 | 0,0116 ± 0,0064 | nm |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,16 | < 0,18 | < 0,17 | < 0,17 | < 0,16 |
| | ¹³⁴ Cs | < 0,14 | < 0,16 | < 0,14 | < 0,18 | < 0,19 |
| | ⁹⁰ Sr | nm | 0,055 ± 0,005 | nm | nm | 0,072 ± 0,014 |

nm : non mesuré

Compartiment aquatique continental

Eaux de surface

Des prélèvements d'eau mensuels, bimensuels et trimestriels sont respectivement réalisés dans les ruisseaux de la Sainte-Hélène, des Landes et des Moulinets.

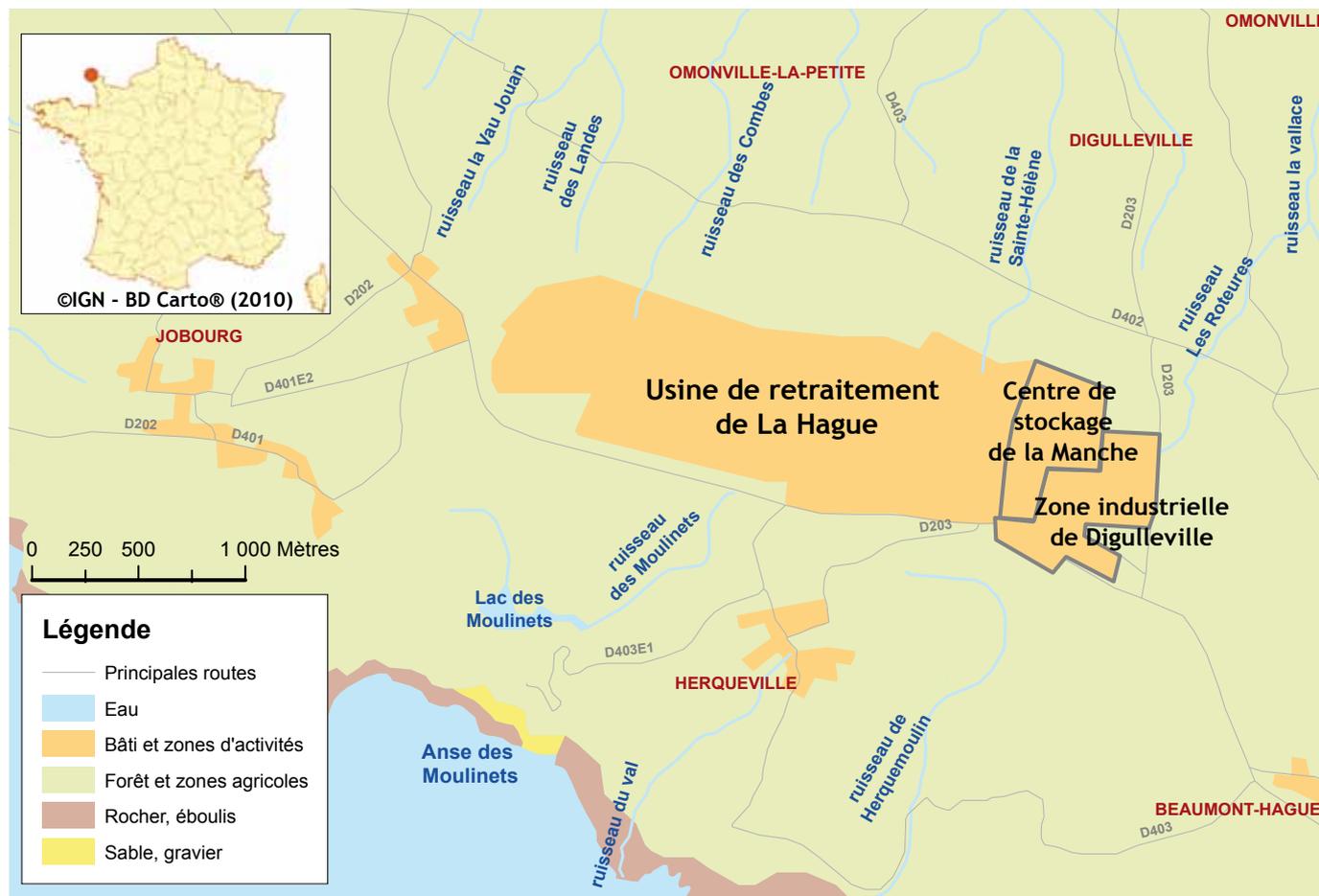


FIGURE IV.32 Localisation des ruisseaux autour du site de La Hague.

Des activités en tritium ont été mesurées dans l'eau des ruisseaux surveillés avec des maxima dans la Sainte-Hélène à Diguleville, à mettre en relation avec la présence de tritium dans les eaux de la nappe phréatique, provoquée par un incident de stockage survenu en 1976 sur le centre de l'ANDRA (source : *Résultats des mesures de la surveillance de l'environnement, 2^e semestre 2006, Centre de stockage de la Manche, ANDRA*).

Dans le ruisseau des Landes au nord-ouest du site, des activités en strontium 90 ont été enregistrées dans tous les prélèvements de l'année (*Tableau IV.38*). Ces activités sont à mettre probablement en relation avec la contamination en strontium 90 de la nappe phréatique par des déchets mal confinés en surface du site dans les années 1980.

TABLEAU IV.38 Activités moyennes mesurées dans l'eau prélevée en 2009 dans l'environnement du site de La Hague (Bq/L).

| | Radionucléide | Ruisseau de la Sainte-Hélène | Ruisseau des Moulinets Le Batardeau | Ruisseau des Moulinets Source Recboc | Ruisseau des Landes |
|----------------|------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| Eau de surface | ³ H | 68,6 ± 2,4 | 11,66 ± 0,75 | 16,88 ± 0,85 | 7,9 ± 1,5 |
| | α global | 0,0107 ± 0,0023 | 0,0235 ± 0,0030 | 0,00189 ± 0,00056 | 0,0230 ± 0,0066 |
| | β global | 0,118 ± 0,017 | 0,205 ± 0,016 | 0,212 ± 0,016 | 2,5 ± 0,43 |
| | ⁹⁰ Sr | nm | nm | nm | 1,1 ± 0,13 |

nm : non mesuré

Sédiments de rivière

Des prélèvements de sédiments sont réalisés chaque semestre dans les ruisseaux de la Sainte-Hélène, des Landes et des Moulinets. Les analyses révèlent la présence de radionucléides d'origine artificielle (^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am) (Figures IV.33 et IV.34). Le ruisseau des Landes présente les concentrations les plus élevées, en particulier pour le strontium 90.

D'après les chroniques de concentrations en ^{90}Sr et $^{239-240}\text{Pu}$, disponibles depuis 1996, le marquage des sédiments dans le ruisseau des Landes semble dater principalement de contaminations survenues durant la période 2001-2003 (Figures IV.35 et IV.36).

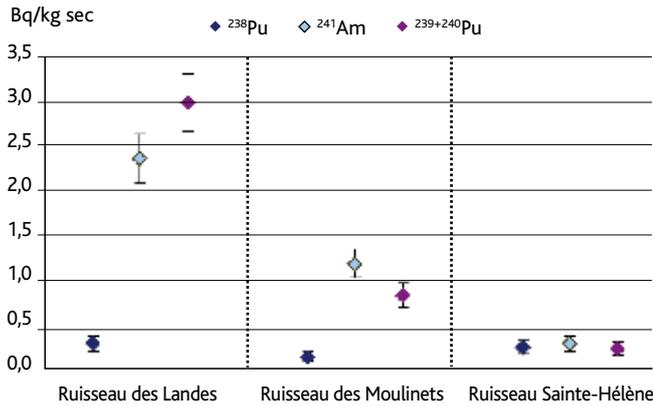


FIGURE IV.33 Activités (moyennes annuelles) mesurées en ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am dans les sédiments prélevés dans les ruisseaux des Landes, Moulinets et Sainte-Hélène en 2009, à proximité de l'usine AREVA-NC de La Hague.

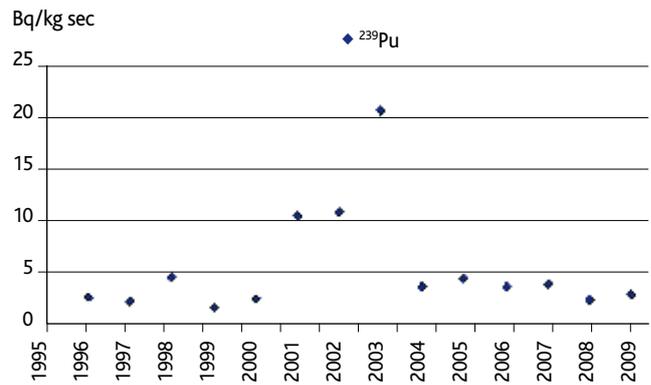


FIGURE IV.35 Évolution des activités massiques moyennes en $^{239+240}\text{Pu}$ dans les sédiments du ruisseau des Landes de 1996 à 2009.

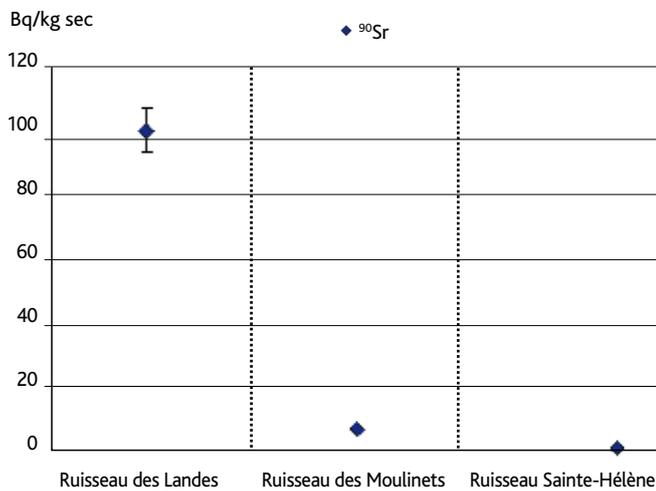


FIGURE IV.34 Activité (moyenne annuelle) en ^{90}Sr mesurée dans les sédiments prélevés dans les ruisseaux des Landes, Moulinets et Sainte-Hélène en 2009, à proximité de l'usine AREVA-NC de La Hague.

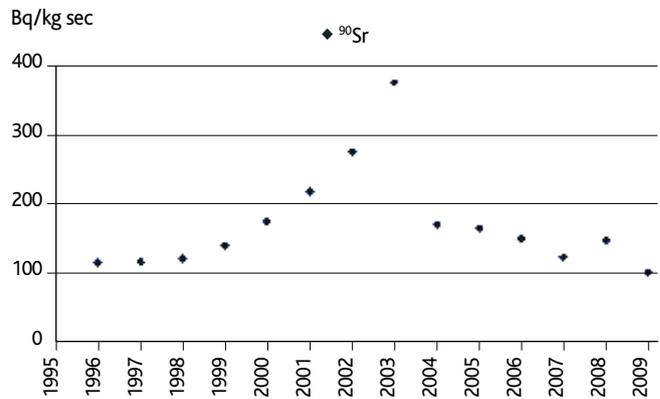


FIGURE IV.36 Évolution des activités massiques en ^{90}Sr dans les sédiments du ruisseau des Landes de 1996 à 2009.

Compartiment marin

À l’instar du redéploiement opéré sur la surveillance du littoral, la surveillance réalisée en champ proche des sites nucléaires du Cotentin a été optimisée en 2009 par l’IRSN. Elle comprend dorénavant trois stations principales (Barneville-Carteret, Auderv lle/Goury

et Barfleur/Montfarville) où sont réalisés des prélèvements d’eau de mer, de sédiments et bio-indicateurs (algues, mollusques, crustacés et poissons) complétés de prélèvements unitaires tels que présentés sur la carte de la Figure IV.37.

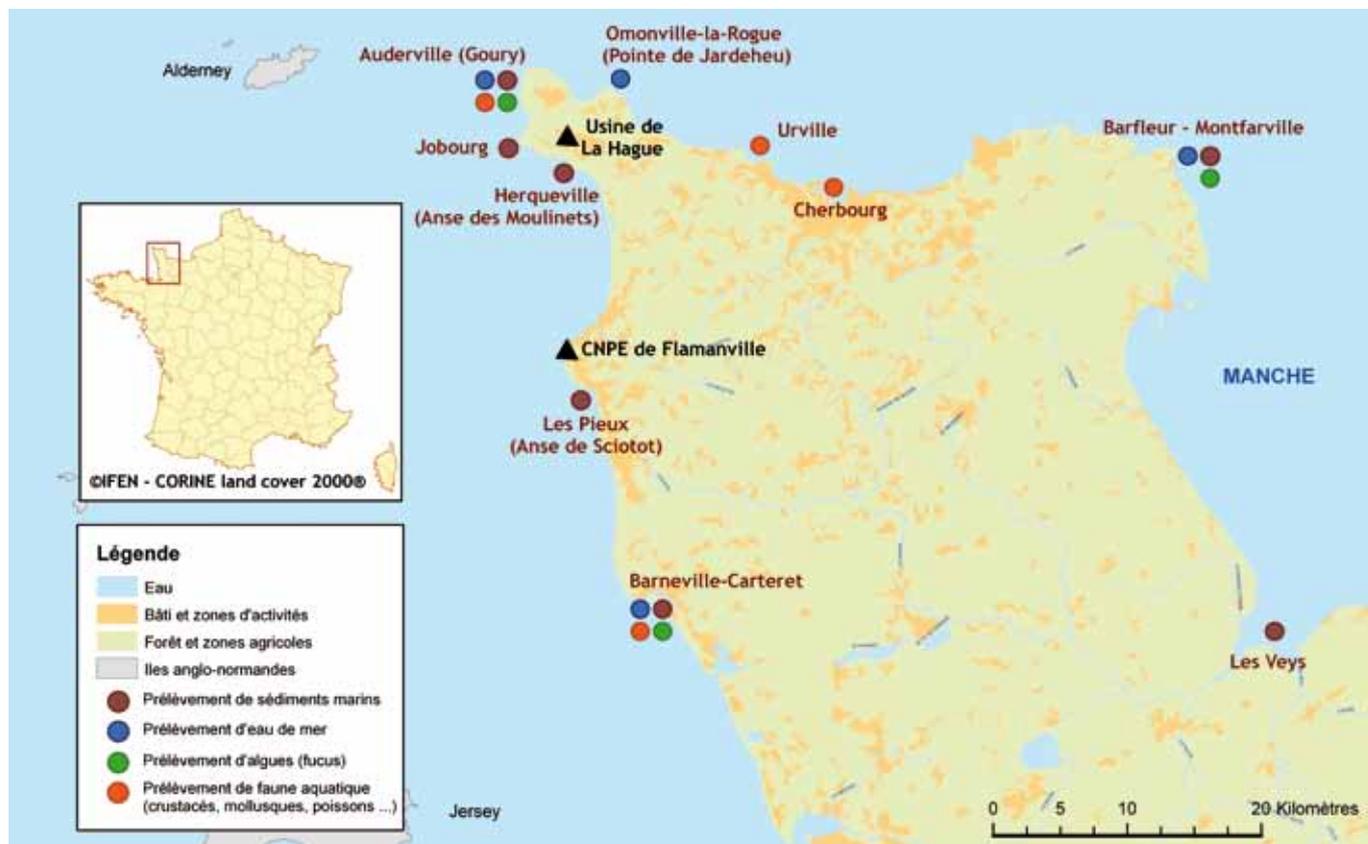


FIGURE IV.37 Lieux de prélèvements de faune, flore et sédiments marins sur le littoral du Nord-Cotentin.

Eau de mer

Des prélèvements trimestriels sont effectués à Auderv lle, Barneville, Barfleur et Omonville-la-Rogue à la pointe de Jardeheu.

Les analyses (Tableau IV.39) mettent en évidence un léger marquage en tritium dans les eaux prélevées à proximité du point de rejet des effluents liquides du site de La Hague, l’activité maximale étant observée à Omonville-la-Rogue (21 ± 3 Bq/L). Cette activité décroît avec l’éloignement par rapport au point de rejet des effluents.

Les analyses des prélèvements d’eau en spectrométrie gamma montrent la présence de ^{60}Co , ^{137}Cs et ^{106}Rh au niveau de Goury qui sont liées aux activités de l’usine de retraitement de La Hague (voir Focus page 120).

TABLEAU IV.39 Activités mesurées dans les eaux de mer prélevées en 2009 dans l’environnement proche de l’usine de La Hague (Bq/L).

| | Radionucléide | Auderville | Barneville | Barfleur | Omonville-la-Rogue |
|------------|-----------------------|-------------------|-----------------|----------------|--------------------|
| Eau de mer | ^3H | $7,91 \pm 0,38$ | $3,09 \pm 0,69$ | $5,07 \pm 0,7$ | $9,8 \pm 1,5$ |
| | ^{137}Cs | $2,25 \pm 0,11$ | nm | nm | nm |
| | ^{60}Co | $0,194 \pm 0,042$ | nm | nm | nm |
| | ^{106}Rh | $1,11 \pm 0,31$ | nm | nm | nm |
| | ^{238}Pu | nm | nm | nm | $< 0,0011$ |
| | $^{239+240}\text{Pu}$ | nm | nm | nm | $< 0,00083$ |

nm : non mesuré

Variabilité de mesures de surveillance à proximité d'un émissaire : le tritium à Goury

Le port de Goury est situé à l'extrémité ouest de la pointe du Cotentin, à 6 km au nord de l'émissaire de rejet en mer de l'usine AREVA-NC, sur la commune d'Auderville. Ce site est utilisé comme station de référence pour la surveillance de l'impact côtier de ces rejets.

En raison de l'intensité des courants de marée dans cette zone, le panache des rejets de l'usine parcourt plusieurs dizaines de kilomètres en quelques heures. Cependant, les rejets étant effectués à 2 km de la côte, leur influence n'est perçue à Goury qu'avec un décalage d'environ 15 jours.

Les mesures individuelles montrent en outre une grande variabilité, confirmée par des simulations de la dispersion effectuées avec un

modèle hydrodynamique de la zone. Cette variabilité s'explique : par la complexité de l'hydrodynamique avec plusieurs tourbillons qui évoluent en fonction de la marée, au large et dans les baies voisines et donnant lieu à des conditions de dispersion très différentes en fonction de l'heure des rejets.

Pour apprécier l'importance de ces variations et mieux interpréter les résultats de mesures de surveillance, un suivi à haute fréquence des concentrations dans l'eau de mer en tritium libre (HTO) a été effectué durant six jours, du 23 au 29 juin 2009. Un automate de prélèvement a été mis en place dans l'abri de la station de sauvetage de Goury afin de prélever un échantillon toutes les 10 minutes.

Les résultats présentés sur la Figure IV.38 mettent en évidence une variabilité importante des concentrations, d'un facteur 2 à 3 en quelques dizaines de minutes et d'un facteur 10 en quelques heures.

Cette variabilité ne résulte pas uniquement des quantités rejetées, mais aussi des heures de rejet et des conditions hydrodynamiques locales. Ces conditions peuvent induire des écarts de concentration d'un ordre de grandeur, indépendants des flux rejetés.

La compréhension des phénomènes de dispersion dans cette zone, progressivement intégrée dans des modèles hydrodynamiques de dispersion, permettrait de prévoir ou interpréter a posteriori les mesures « anormales ».

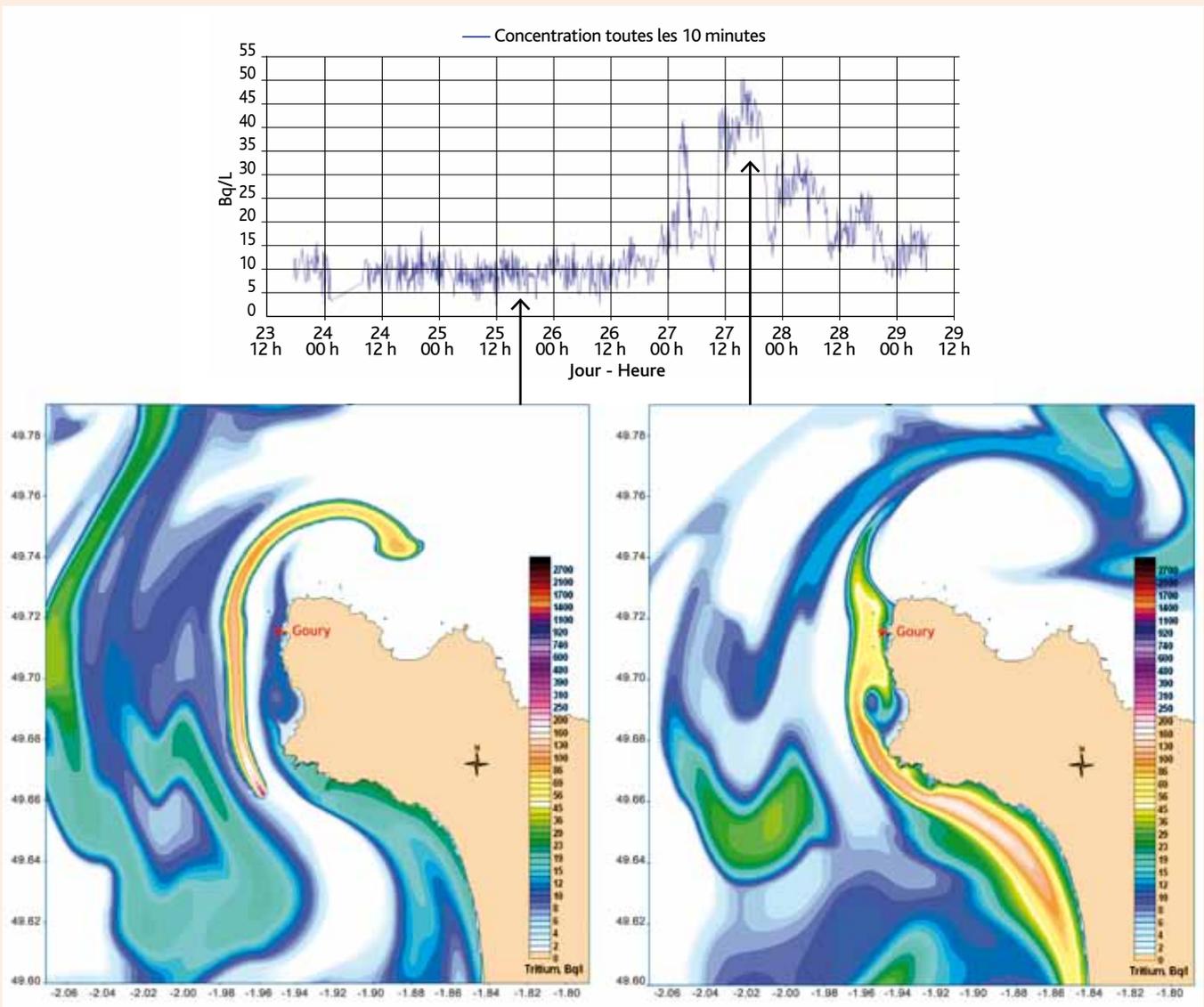


FIGURE IV.38 Activités en tritium mesurées toutes les 10 minutes dans l'eau de mer à Goury du 23 au 29 juin 2009.

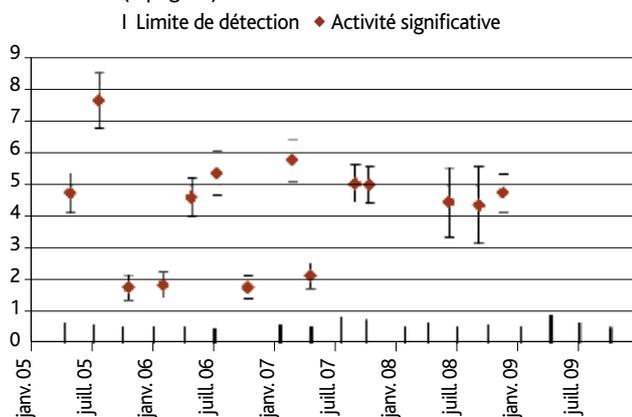
Sédiments marins

Les stations de prélèvement de sédiments sont disposées le long du littoral de la Basse-Normandie à Auderville (Goury), Jobourg, Herqueville (anse des Moulinets), Barfleur, Les Pieux (anse de Sciotot), Les Veys, Barneville et Montfarville (Figure IV.37).

TABEAU IV.40 Activités massiques (Bq/kg sec) en ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ²³⁸Pu, ²⁴¹Am et ²³⁹⁺²⁴⁰Pu mesurées dans les sédiments marins prélevés en 2009 le long du littoral de la Manche.

| | Commune | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | ²³⁸ Pu | ²⁴¹ Am | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu |
|------------------|----------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Sédiments marins | Auderville | 0,665 ± 0,062 | 1,57 ± 0,16 | 0,21 ± 0,11 | 1,21 ± 0,15 | 0,54 ± 0,16 |
| | Jobourg | < 0,67 | 0,7 ± 0,15 | 0,24 ± 0,05 | 1,02 ± 0,1 | 0,56 ± 0,076 |
| | Herqueville (anse des Moulinets) | < 0,59 | 1,23 ± 0,14 | 0,46 ± 0,068 | 1,78 ± 0,15 | 0,71 ± 0,086 |
| | Barfleur | < 0,78 | < 0,73 | 0,3 ± 0,13 | 1,17 ± 0,25 | 0,64 ± 0,19 |
| | Les Pieux | < 0,58 | < 0,61 | 0,142 ± 0,041 | 0,445 ± 0,086 | 0,29 ± 0,062 |
| | Les Veys | 0,35 ± 0,22 | < 0,60 | 0,155 ± 0,058 | 0,69 ± 0,12 | 0,37 ± 0,087 |
| | Barneville | 0,950 ± 0,089 | 1,57 ± 0,24 | 0,084 ± 0,063 | 0,4 ± 0,13 | 0,28 ± 0,10 |
| | Montfarville | 0,377 ± 0,058 | 0,289 ± 0,082 | 0,088 ± 0,063 | 0,28 ± 0,11 | 0,26 ± 0,10 |

Activité ¹³⁷Cs (Bq/kg sec)



Activité ⁶⁰Co (Bq/kg sec)

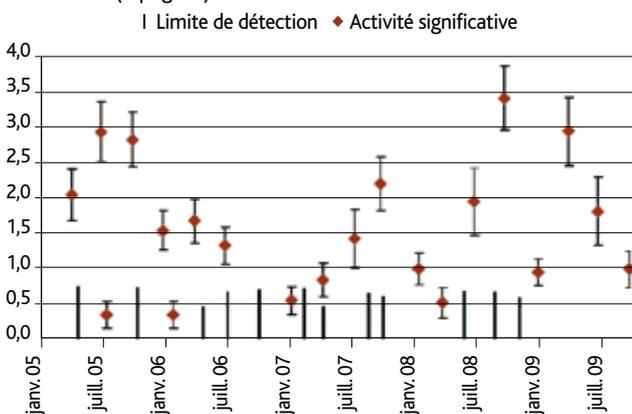


FIGURE IV.39 Évolution des activités massiques (Bq/kg sec) annuelles en ¹³⁷Cs et ⁶⁰Co mesurées dans les sédiments marins prélevés depuis 2005 à l'anse des Moulinets.

L'analyse des sédiments (Tableau IV.40) révèle la présence de radionucléides d'origine artificielle (¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ²⁴¹Am), liée principalement aux rejets d'effluents liquides passés et présents des installations du site de La Hague. Les concentrations mesurées en 2009 restent faibles, souvent proches des limites de détection et ne mettent pas en évidence un événement anormal particulier. Elles restent du même ordre de grandeur que celles mesurées ces dernières années.

La Figure IV.39 illustre l'évolution de ces concentrations depuis 2005 pour le césium 137 et le cobalt 60 au niveau de l'anse des Moulinets (Herqueville), qui est la station de prélèvement située sous l'influence directe des rejets du site AREVA-NC de La Hague.

Les concentrations en transuraniens (²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et ²⁴¹Am) mesurées dans les sédiments prélevés dans cette anse des Moulinets, légèrement supérieures aux autres lieux de prélèvements (Figure IV.40), confirment la sensibilité de cette zone au regard des rejets du site de La Hague.

Néanmoins, même si les niveaux d'activité mesurés tendent à diminuer le long du littoral à mesure que l'on s'éloigne du point de rejet, les variations enregistrées sont aussi conditionnées par la nature des sédiments prélevés. En effet, ceux-ci présentent des capacités différentes de fixation des radionucléides, en particulier en fonction de leur granulométrie.

Flore marine

Une surveillance trimestrielle de la radioactivité des algues (*Fucus Serratus* et *Fucus Vesiculosus*) est assurée sur trois stations de prélèvements disposées le long du littoral : Barneville-Carteret, Auderville/Goury et Barfleur/Montfarville. Au-delà du fait que les algues marines entrent dans la composition de produits consommés par l'homme (alginates), ces organismes intègrent les variations de la radioactivité de l'eau et représentent donc un bon indicateur biologique de l'évolution de la concentration d'un polluant.

Les analyses de ces algues en 2009 révèlent la présence de différents radionucléides d'origine artificielle (^{14}C , isotopes du Pu, ^{241}Am , ^{60}Co et ^{129}I) avec des activités faibles, du même ordre de grandeur que les années antérieures récentes, et fluctuantes selon les stations.

Les algues prélevées à Auderville/Goury, station la plus exposée aux rejets d'effluents liquides de La Hague, présentent des concentrations en iode 129 et en transuraniens plus élevées qu'au niveau des autres zones de prélèvements (Figures IV.41 et IV.42). Ces marquages sont imputables en grande partie, voire essentiellement, aux rejets liquides du site AREVA-NC de La Hague. En effet, la centrale EDF de Flamanville ne rejetant ni de transuraniens, ni d'iode 129 et 1 000 et moins de cobalt 60, son influence sur ces marquages ne peut être que très secondaire.

Les activités en carbone 14 mesurées dans les algues prélevées le long du littoral (Tableau IV.41) sont imputables aux rejets liquides de l'usine AREVA-NC de La Hague, supérieurs à ceux du CNPE de Flamanville : les algues prélevées à Auderville/Goury et Montfarville/Barfleur présentent une activité en carbone 14 presque deux fois supérieure à celle mesurée à Barneville-Carteret en raison des courants résiduels de la Manche orientés de l'ouest vers l'est.

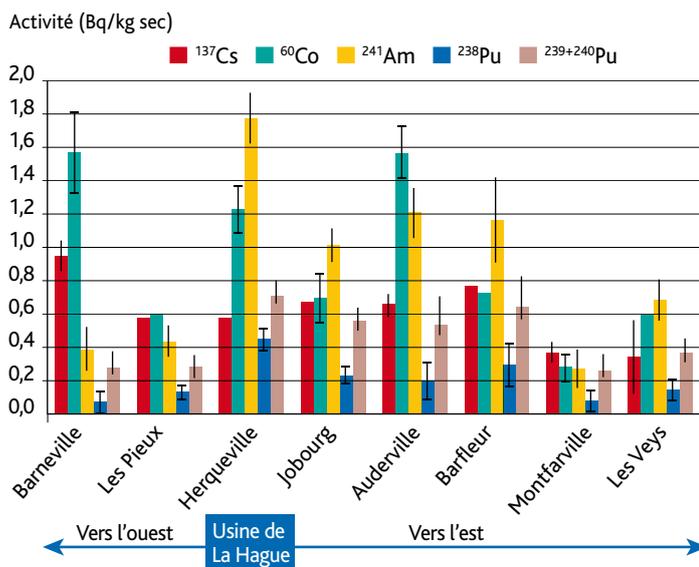


FIGURE IV.40 Activités massiques (Bq/kg sec) moyennes des principaux radionucléides mesurés dans les sédiments marins prélevés en 2009 le long du littoral de la Manche.

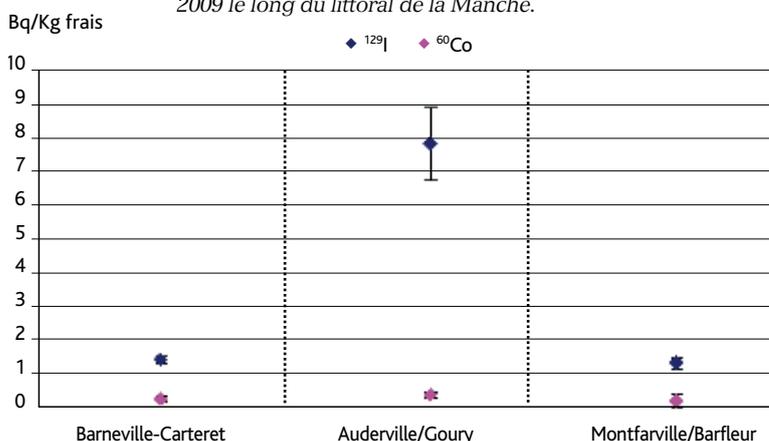


FIGURE IV.41 Activités en ^{129}I et ^{60}Co mesurées dans les algues prélevées en 2009 (Bq/kg frais) le long du littoral de la Manche.

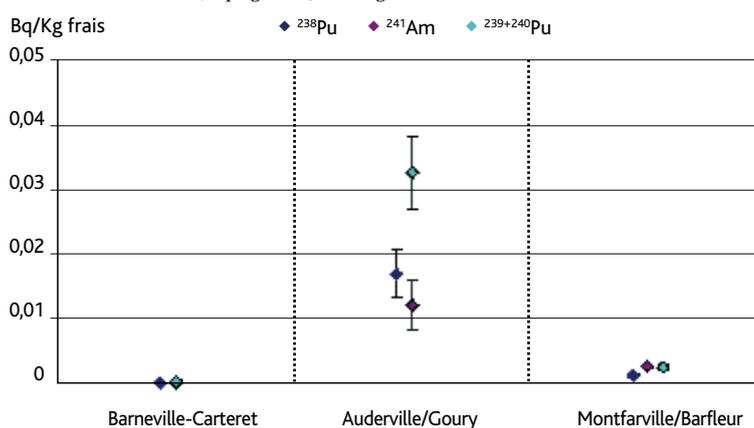


FIGURE IV.42 Activités en ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am mesurées dans les algues prélevées en 2009 le long du littoral de la Manche.

TABLEAU IV.41 Activité en carbone 14 mesurée dans les algues prélevés en 2009 le long du littoral du Cotentin (Bq/kg C).

| Flore aquatique | Radionucléide | Barneville-Carteret | Auderville Goury | Montfarville Barfleur |
|-----------------|-----------------|---------------------|------------------|-----------------------|
| | ^{14}C | 284,76 ± 0,69 | 458,4 ± 1,2 | 511,40 ± 0,74 |

Faune marine

En 2009, des mesures radiologiques ont été effectuées sur les organismes suivants : patelles, moules, bulots, coquilles Saint-Jacques, crabes, araignées de mer et poissons, les résultats sont présentés dans le Tableau IV.42.

TABLEAU IV.42 Activités moyennes mesurées dans les prélèvements de faune aquatique des environs de La Hague (Bq/kg frais).

| | | Barneville-Carteret | | Auderville/Goury | Montfarville/Barfleur | |
|------------|-----------------------|---------------------|--------|------------------|-----------------------|------------|
| | | Patelles | Bulot | Patelles | Moules | St-Jacques |
| Mollusques | ¹²⁹ I | nm | nm | 0,33 ± 0,14 | 0,19 ± 0,11 | nm |
| | ¹³⁷ Cs | 0,054 ± 0,058 | < 0,14 | < 0,043 | 0,032 ± 0,035 | < 0,11 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,041 | < 0,16 | < 0,13 | < 0,037 | < 0,11 |
| | ²³⁸ Pu | 0,0040 ± 0,0021 | nm | < 0,0063 | < 0,0019 | nm |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 0,0125 ± 0,0037 | nm | < 0,0094 | 0,0031 ± 0,0010 | nm |
| | ²⁴¹ Am | 0,0182 ± 0,0051 | nm | 0,0201 ± 0,0053 | 0,0053 ± 0,0017 | nm |

| | | Cherbourg | | Urville |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------|----------|
| | | Araignée de mer | Poisson | Crabe |
| Crustacés et poissons | ¹²⁹ I | < 0,27 | nm | < 0,36 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,021 | < 0,19 | < 0,16 |
| | ⁶⁰ Co | 0,081 ± 0,23 | < 0,16 | < 0,19 |
| | ²³⁸ Pu | < 0,00081 | < 0,0024 | < 0,0028 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 0,00089 ± 0,00053 | < 0,0024 | < 0,45 |
| | ²⁴¹ Am | 0,00152 ± 0,00081 | < 0,013 | nm |
| | ⁴⁰ K | 62,4 ± 9,6 | 93,5 ± 8,0 | 89 ± 11 |

* nm : non mesuré

Des valeurs significatives en isotopes du plutonium et de l'américium 241 ont été relevées sur les patelles, moules et araignées de mer. Ces radionucléides sont caractéristiques des effluents liquides du site AREVA-NC de La Hague. Les concentrations de ces transuraniens restent faibles (0,0021 Bq/kg frais au maximum en americium 241 dans des patelles à Goury), et sont du même ordre de grandeur que les années antérieures récentes.

Parmi les radionucléides rejetés dans les effluents liquides du site de La Hague, quelques traces de produits de fission sont également décelables dans la faune marine (0,081 Bq/kg frais en cobalt 60 dans une araignée de mer à Cherbourg et 0,19 à 0,33 Bq/kg frais en iode 129 dans quelques mollusques).

IV.6 LA SURVEILLANCE DES CENTRES DE STOCKAGE DES DÉCHETS

Pour le stockage des déchets radioactifs de faible et moyenne activité à vie courte, l'ANDRA a d'abord exploité le Centre de stockage de la Manche (CSM), désormais fermé. Elle exploite aujourd'hui, dans l'Aube, le Centre de stockage de déchets de faible et moyenne activité à vie courte (CSFMA) et le Centre de stockage de déchets de très faible activité (CSTFA). Ces deux centres, dits « de stockage de surface », sont situés sur les communes de Soulaines et de Morvilliers (Aube).

Ces sites de stockage sont soumis soit à la réglementation applicable aux INB (CSM et CSFMA), soit à celle relative aux ICPE (CSTFA), qui imposent à l'exploitant d'assurer une surveillance de l'environnement comprenant des mesures radiologiques et chimiques sur des eaux pluviales, de surface (ruisseaux) et souterraines et de l'air ambiant. Après la phase

d'exploitation (conditionnement et entreposage), la réglementation prévoit que l'ANDRA maintienne une surveillance du site et de l'environnement pendant plusieurs dizaines d'années pour s'assurer de l'absence d'impact sanitaire du stockage sur l'homme et son environnement.

En parallèle, une surveillance est conduite par l'IRSN dans l'environnement du CSM et du CSFMA.

CENTRE DE STOCKAGE DE LA MANCHE (50)

Le dispositif de surveillance par l'IRSN de ce site étant confondu avec celui du centre AREVA-NC, les résultats de cette surveillance sont consultables au paragraphe relatif à la surveillance du site de La Hague.

CENTRE DE STOCKAGE DE SOULAINES (10)

L'environnement proche du centre de stockage de Soulaines fait l'objet d'une surveillance régulière type (DTL, Téléray, des prélèvements d'aérosols, d'eaux de pluie, d'eaux usées et pluviales et de sédiments).

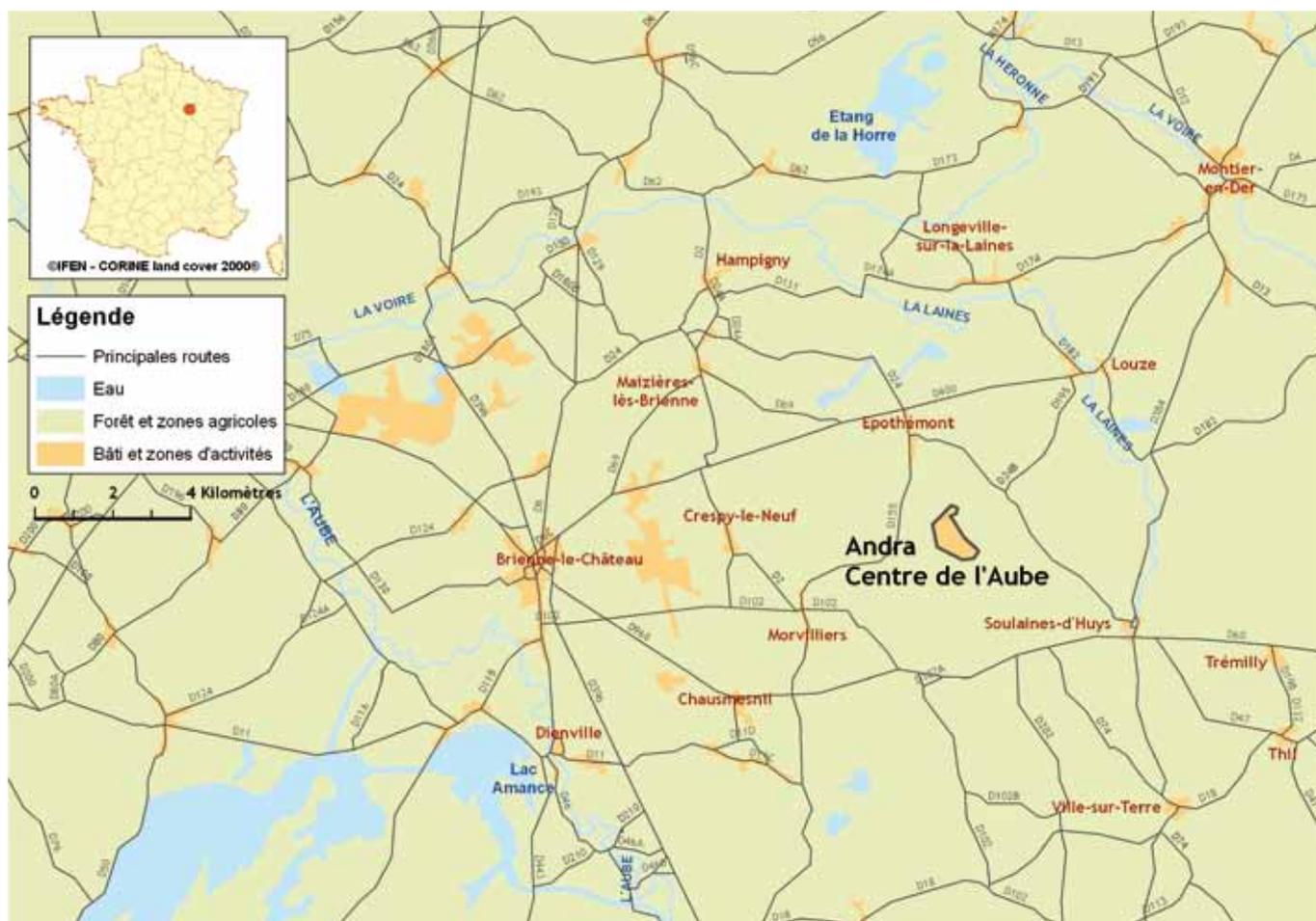


FIGURE IV.43 Implantation du centre de stockage de Soulaines dans l'Aube.

Compartiment atmosphérique

Aucune activité gamma ambiante anormale n'a été enregistrée par les dosimètres thermoluminescents environnants ou par la balise Téléray implantée sous les vents dominants de l'installation, ni sur les filtres aérosols prélevés quotidiennement, dans l'environnement du centre de stockage.

Un prélèvement d'eaux de pluie est réalisé mensuellement. Aucune activité en radionucléide artificiel n'a pu être mise en évidence au-dessus des limites de détection associées aux techniques de mesure utilisées.

Eaux usées et eaux pluviales

Un prélèvement d'eau continu est réalisé par un hydro-collecteur dans le bassin collecteur du site avant rejet. Ce bassin recueille les eaux pluviales et les eaux usées du site.

Aucune activité en radionucléide artificiel n'a pu être mise en évidence au-dessus des limites de détection associées aux techniques de mesure utilisées (Tableau IV.43).



FIGURE IV.44 Vue du collecteur d'eaux de pluie IRSN au centre de Soullaines.

TABLEAU IV.43 Activités moyennes mesurées dans l'eau prélevée en 2009 dans le bassin collecteur du centre de l'Aube – ANDRA (Bq/L).

| | Point de prélèvement | Radionucléide | Activité |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|
| Eaux pluviales / eaux usées | Bassin d'orage | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | < 0,0009 |
| | | ²³⁸ Pu | < 0,001 |
| | | ²⁴¹ Am | < 0,002 |
| | | ³ H | < 4,8 |
| | | ⁶⁰ Co | < 0,08 |
| | | Alpha global | 0,0222 ± 0,0028 |
| | | Bêta global | 0,226 ± 0,017 |

Sédiments

Aucune activité en radionucléide artificiel n'a été décelée dans les sédiments prélevés annuellement dans le bassin d'orage (Tableau IV. 44).

TABLEAU IV.44 Activités moyennes mesurées dans les sédiments prélevés en 2009 dans le bassin collecteur du centre de l'Aube – ANDRA (Bq/kg sec).

| | Point de prélèvement | Radionucléide | Activité |
|-----------|----------------------|-------------------|----------|
| Sédiments | Bassin d'orage | ⁴⁰ K | 211 ± 29 |
| | | ¹³⁷ Cs | < 0,52 |
| | | ⁶⁰ Co | < 0,45 |



V

LES RÉSULTATS DE LA SURVEILLANCE DES CENTRES DE RECHERCHE ET DES BASES NAVALES NUCLÉAIRES

V.1 Les centres d'études nucléaires du CEA

V.2 Les centres de recherche internationaux

V.3 Les bases navales nucléaires

Les résultats présentés dans ce chapitre concernent la surveillance opérée sur les sites positionnés sur la Figure V.1 ci-dessous.

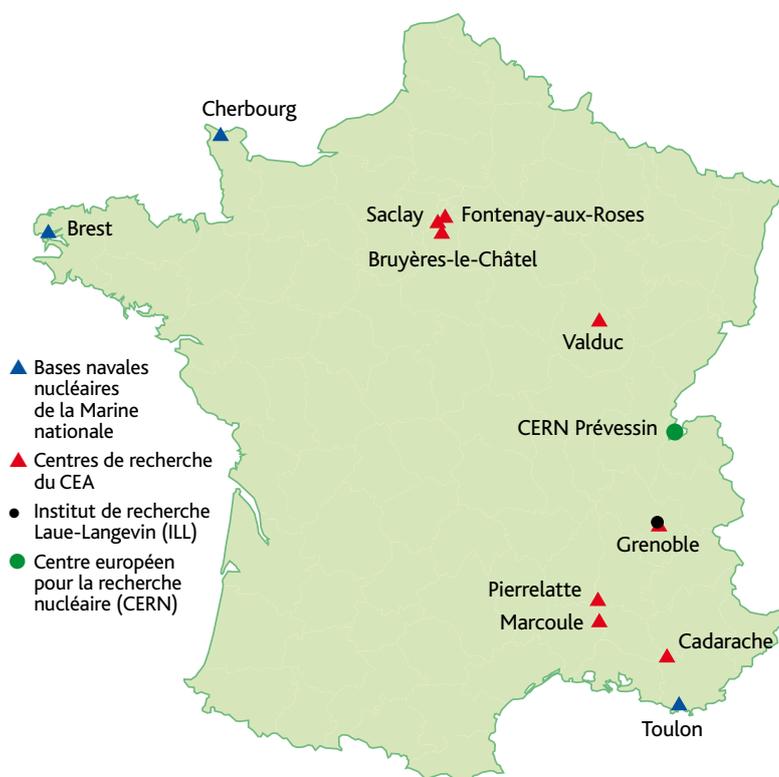


FIGURE V.1 Implantation des centres de recherche et des bases navales nucléaires.

■ V.1 LES CENTRES D'ÉTUDES NUCLÉAIRES DU CEA

La surveillance mise en place par l'IRSN autour des centres d'études nucléaires du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) est adaptée aux différentes sources d'exposition radiologiques potentielles de l'ensemble du site sur lequel les installations CEA sont installées (un site pouvant regrouper des installations nucléaires autres que celles du CEA) et aux spécificités environnementales de chacun des sites.

C'est pourquoi, les programmes de surveillance (fréquence, matrices prélevées, radionucléides) et les résultats associés sont distincts d'un site à l'autre.

Sont présentés dans ce chapitre, les résultats de la surveillance radiologique des centres de Cadarache, Saclay, Bruyères-le-Châtel et Valduc, ainsi que les contrôles allégés maintenus à proximité des centres de Grenoble et de Fontenay-aux-Roses, dont les activités nucléaires sont fortement réduites. Les résultats de la surveillance de l'environnement du centre de Valrhô, appellation regroupant les installations CEA implantées à Marcoule (30) et Pierrelatte (26), sont consultables au Chapitre IV.5.

Afin d'offrir, quand cela est possible, une vision synthétique de la surveillance radiologique des centres d'études, les résultats sont parfois regroupés pour l'ensemble des sites en distinguant les activités en tritium, radionucléide prépondérant dans les rejets, des autres radionucléides surveillés. En effet, le tritium rejeté sous forme gazeuse est typique des activités liées à des applications militaires (plus de 600 TBq rejetés en 2009), notamment dans les centres CEA de Marcoule (voir Chapitre IV), Valduc, et dans une moindre mesure de Bruyères-le-Châtel (en phase d'assainissement). Il est également très présent dans les rejets des activités de recherche menées sur le centre de Saclay.

PRÉSENTATIONS DES SITES

Le centre de Bruyères-le-Châtel (91), créé en 1955, a abrité les premières études de métallurgie des matières nucléaires utilisées dans les armes. Aujourd'hui, ce centre est un établissement de recherche dont les activités sont regroupées autour de différents pôles (simulation et modélisation du fonctionnement des armes nucléaires, exploitation des compétences dans la surveillance des anciens champs de tirs français, le soutien des organisations internationales pour la vérification du traité d'arrêt complet des essais nucléaires et la gestion des projets de construction, d'assainissement et de démantèlement d'installations nucléaires). Les activités militaires de ce site ont été transférées au centre de Valduc en 1996. Depuis 1997, les opérations d'assainissement des installations en démantèlement continuent de produire des rejets de tritium dans les effluents gazeux, dont l'activité annuelle décroît progressivement (plus de 100 TBq rejetés en 2005, moins de 50 TBq en 2009).

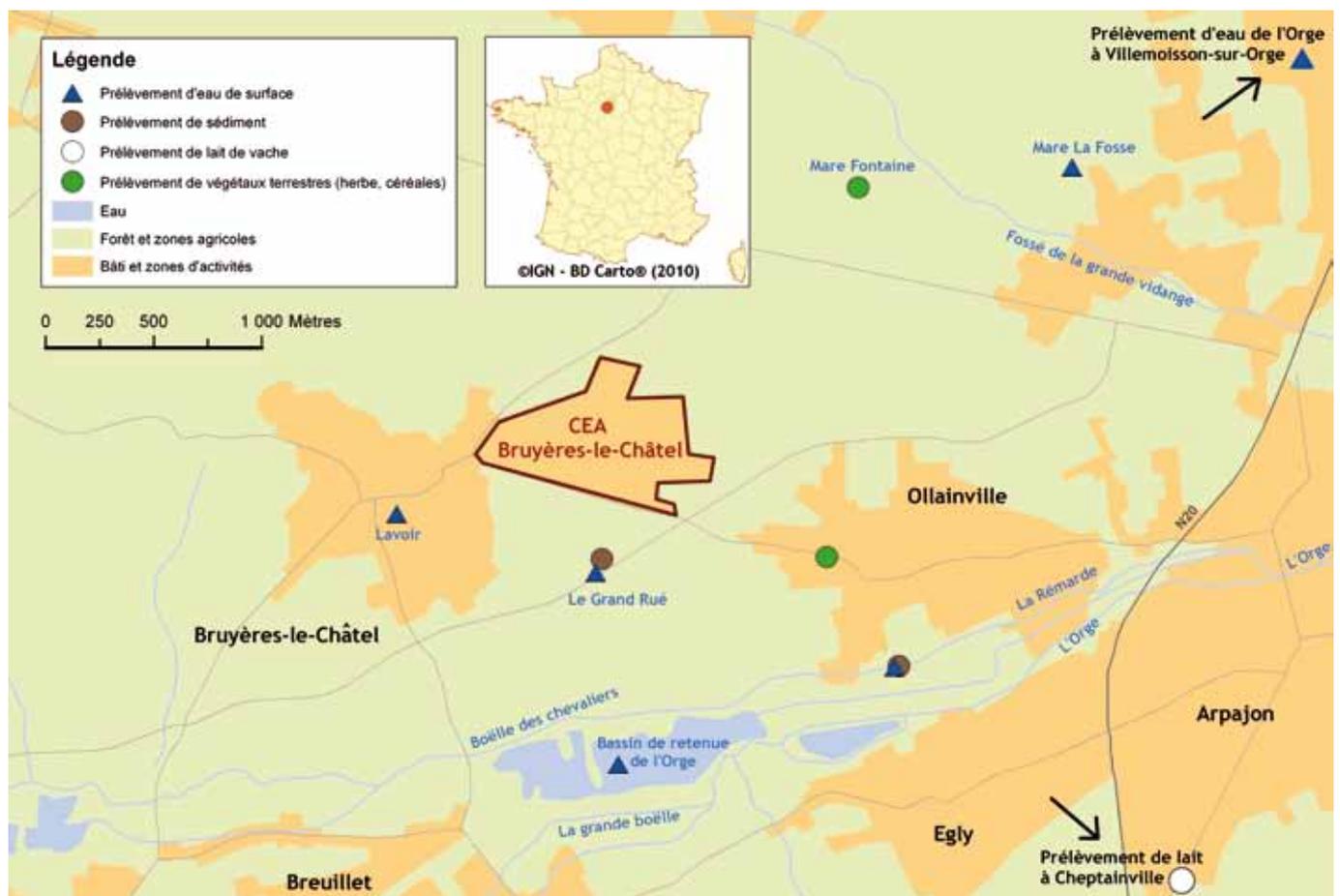


FIGURE V.2 Plan de surveillance de l'environnement du centre CEA de Bruyères-le-Châtel en 2009 (hors aérosols, pluie et Téléray).

Le centre de Cadarache (13), créé en octobre 1959, est implanté sur la commune de Saint-Paul-Lez-Durance, à une quarantaine de kilomètres au nord d'Aix-en-Provence. Les activités de ce centre sont réparties autour de plusieurs plate-formes de recherche et de développement technologiques essentiellement pour l'énergie nucléaire, mais aussi pour les nouvelles technologies pour l'énergie (la biomasse, l'hydrogène) et les études sur les effets des rayonnements sur les plantes (écophysiologie végétale et microbiologie).

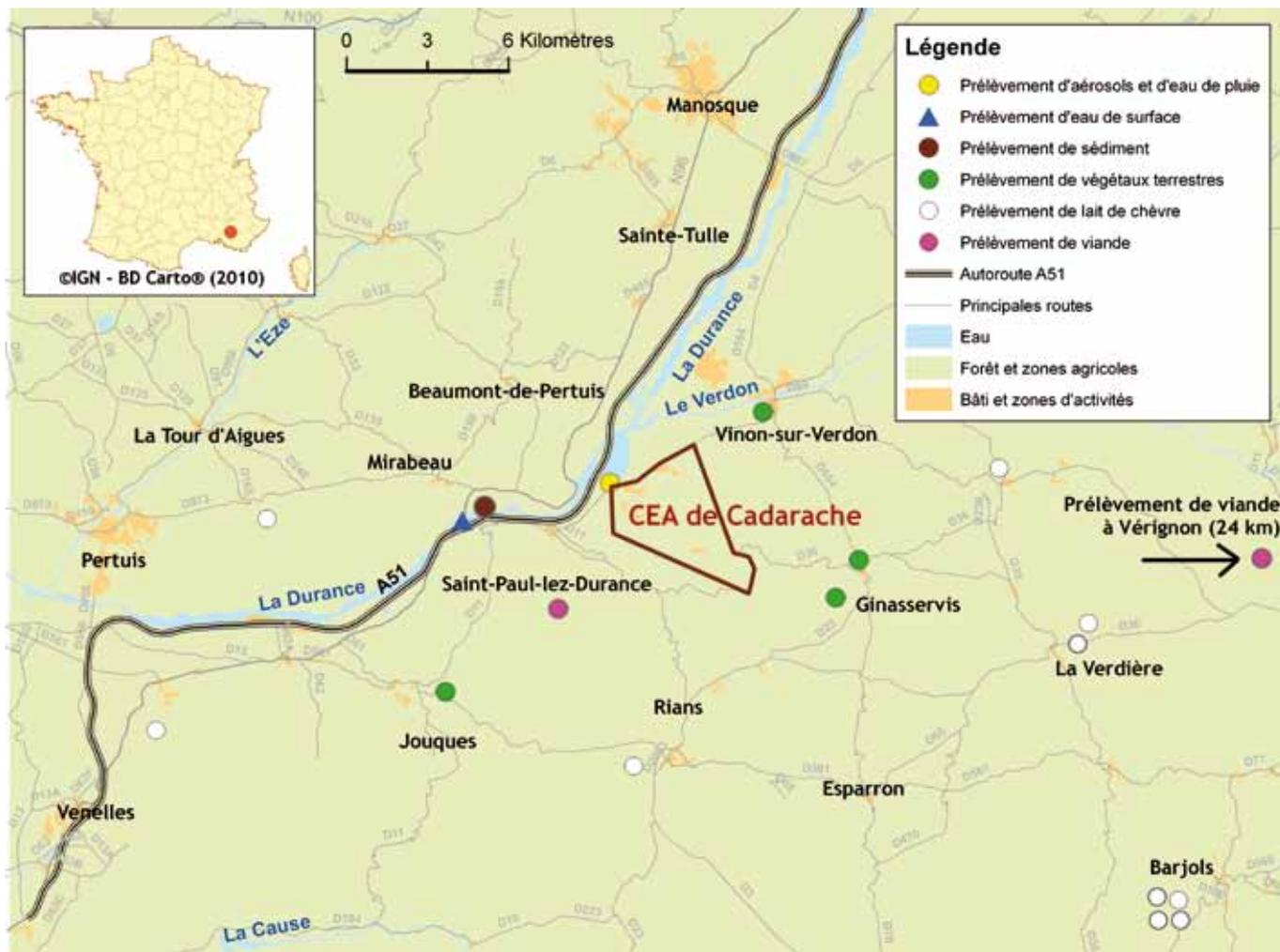


FIGURE V.3 Plan de surveillance de l'environnement du centre du CEA de Cadarache en 2009 (hors Téliéray).

Le centre de Fontenay-aux-Roses (92), premier centre CEA, a été implanté au fort de Châtillon en 1946. Pendant près de dix ans, ce site, situé sur la commune de Fontenay-aux-Roses, était au cœur des activités de recherche et de développement nucléaire en France, avec entre autres la première pile atomique française, Zoé. Après s'être orienté vers la chimie du plutonium et des transuraniens, l'irradiation et l'examen de combustibles, la radio métallurgie et la fusion contrôlée, le CEA a stoppé en 1995 toute activité de recherche nucléaire à Fontenay. Ce centre est aujourd'hui tourné vers des recherches ciblées sur des thématiques à forts enjeux socio-économiques et de santé publique : radiobiologie et toxicologie, neuro-virologie et maladie à prions, robotique et réalité virtuelle.

Le centre de Grenoble (38), installé au cœur d'un environnement scientifique, industriel et universitaire très riche, voit ses activités centrées sur les nouvelles technologies de l'énergie et les biotechnologies

(piles à combustibles, nanoélectronique, matériaux et biopuces) et les activités liées au nucléaire y sont très réduites. La surveillance de l'environnement est dorénavant sous la responsabilité de l'ILL (Institut Laue-Langevin).

Le centre de Saclay (91), créé en 1947 dans l'Essonne à Saclay, effectue de la recherche fondamentale dans les domaines de la chimie, la physique, la biologie et la métallurgie. Dans le domaine de la recherche appliquée, le centre étudie des combustibles et participe au développement des technologies de séparation isotopique ainsi que de divers types de réacteurs.

Il a enfin joué un rôle important dans le développement de la propulsion des sous-marins nucléaires et la fabrication de radionucléides. Les rejets du centre proviennent essentiellement des effluents des réacteurs expérimentaux Orphée et Osiris, de l'entreprise CIS-Bio international (fabrication de produits utilisés en médecine nucléaire) et du laboratoire de marquage de molécules organiques.

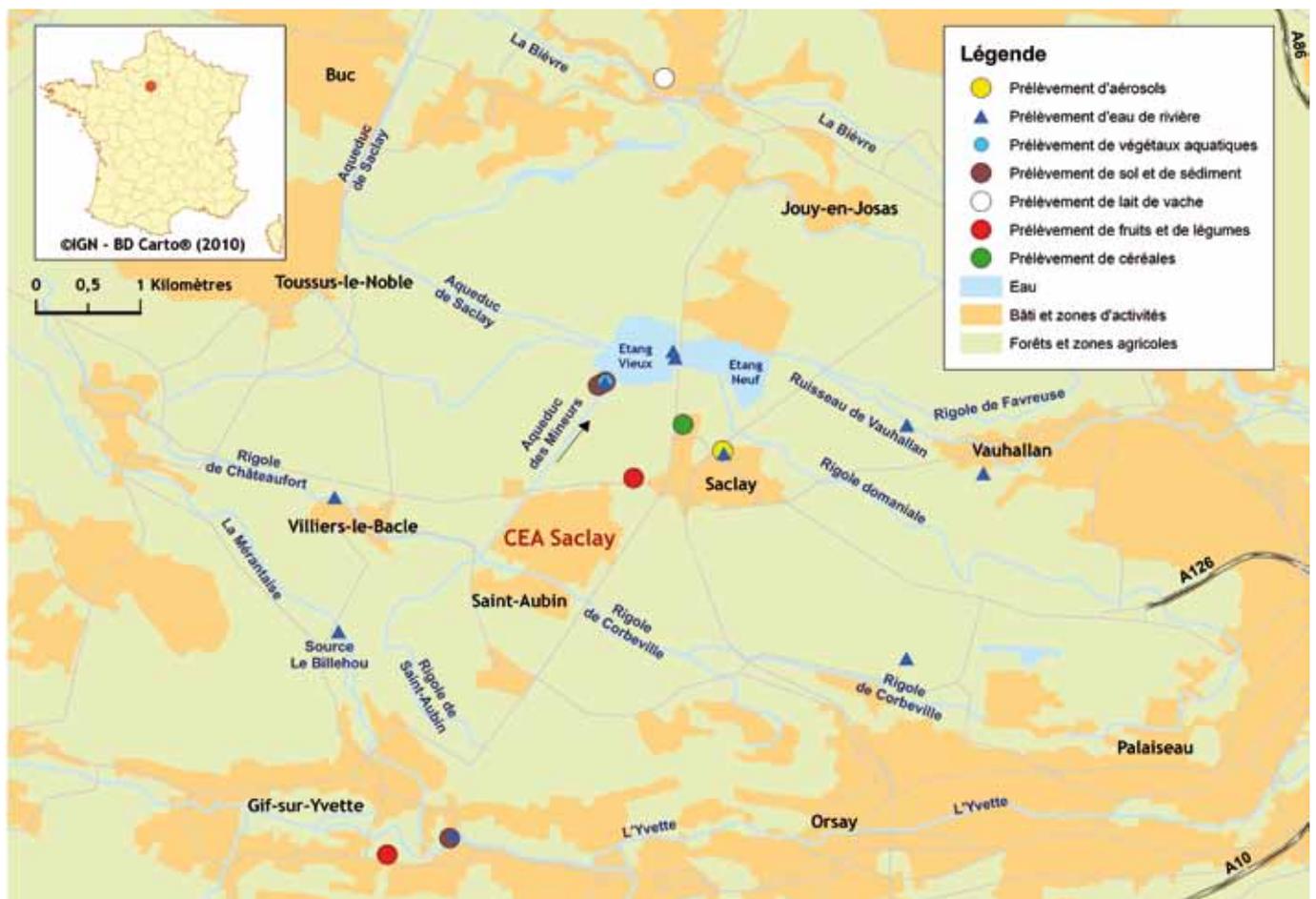


FIGURE V.4 Plan de surveillance de l'environnement du centre CEA de Saclay en 2009 (hors Téléray).

Le centre de Valduc (21), créé depuis 1957 et situé à 45 km au nord-ouest de Dijon, est exclusivement dédié aux études et développements technologiques sur les matériaux nucléaires des armes nécessaires à la force de dissuasion française. De la recherche à la fabrication des composants nucléaires de l'arme, les spécialistes de ce centre se chargent également de la maintenance des têtes nucléaires et de leur démantèlement. Du fait de ses activités particulières sur l'arme atomique, ce site rejette, sous contrôle réglementaire, principalement du tritium gazeux (près de 300 TBq en 2009).

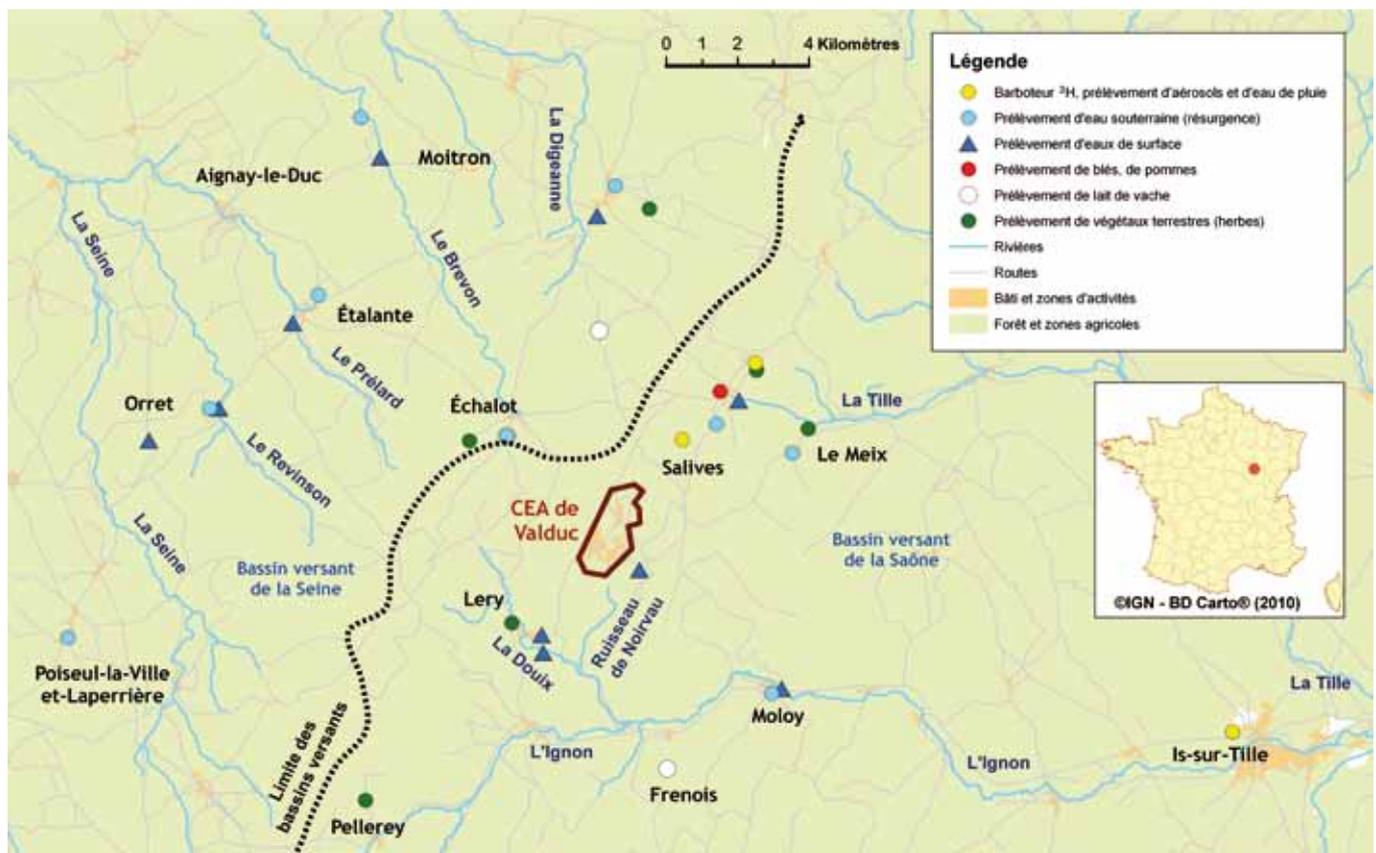


FIGURE V.5 Plan de surveillance de l'environnement du centre de Valduc en 2009 (hors Téléray).

Le centre de Valrhô (26), implanté à Marcoule (30) et Pierrelatte (26), constitue un regroupement de compétences en R&D portant sur les techniques de préparation de l'uranium, le traitement des combustibles nucléaires usés, les techniques d'assainissement et de démantèlement des installations nucléaires en fin de vie et la gestion des déchets les plus radioactifs, ainsi que sur la toxicologie nucléaire.

COMPARTIMENT ATMOSPHERIQUE

Dosimétrie environnementale

En 2009, aucune activité gamma ambiante anormale n'a été enregistrée par les dosimètres thermoluminescents environnants ou par la balise Téléray implantée sous les vents dominants de chacun des centres CEA.

Aérosols atmosphériques

S'agissant des mesures effectuées sur les filtres de prélèvement d'aérosols, aucune activité due à des radionucléides d'origine non naturelle n'a été mise en évidence.

TABLEAU V.1 Limites de détections (mBq/m³) des analyses effectuées sur les filtres aérosols prélevés quotidiennement à proximité des centres CEA par les stations AS du réseau OPERA-Air.

| Aérosols | Radionucléide | Activité volumique |
|------------------|---|--------------------|
| | ⁵⁴ Mn, ¹³⁴ Cs, ^{110m} Ag | < 0,08 |
| | ⁵⁸ Co | < 0,18 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,1 |
| | ¹⁰⁶ Ru, ²⁴¹ Am | < 0,6 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,11 |
| ⁹⁵ Zr | < 0,25 | |

Tritium atmosphérique

Au CEA de Valduc, un barboteur (Figure V.6) prélève de l'air en continu à la station AS1 sous les vents dominants, située sur la commune de Salives.

Le tritium présent dans l'air est détecté en quantité significative principalement sous forme de vapeur d'eau. Cette activité est comprise entre la limite de détection d'environ 0,5 Bq/m³ et 3,8 Bq/m³ (Figure V.7).

Eaux de pluie

Cette surveillance atmosphérique est complétée par l'analyse des eaux de pluie collectées à proximité de tous les centres d'études nucléaires sauf pour le site de Bruyères-le-Châtel. En 2009, comme pour les années antérieures, des activités volumiques significatives en tritium ont été mesurées à proximité du site de Valduc, jusqu'à 87 ± 7 Bq/L (Figure V.8).

Enfin, une recherche des produits de fission et d'activation (²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs et ⁶⁰Co notamment) est également effectuée dans les eaux de pluie de Valduc, mais aucune activité n'a été mesurée au-dessus des limites de détection.



FIGURE V.6 Photo d'un barboteur tritium.

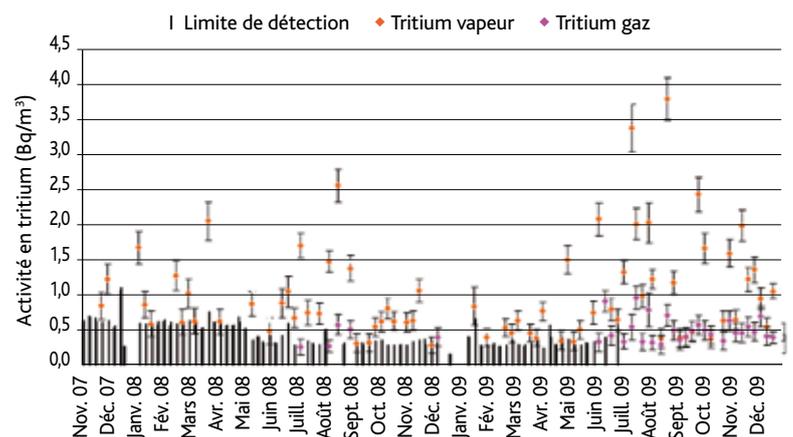


FIGURE V.7 Évolution de l'activité en ³H dans l'air mesurée depuis 2007 à proximité du centre de Valduc.

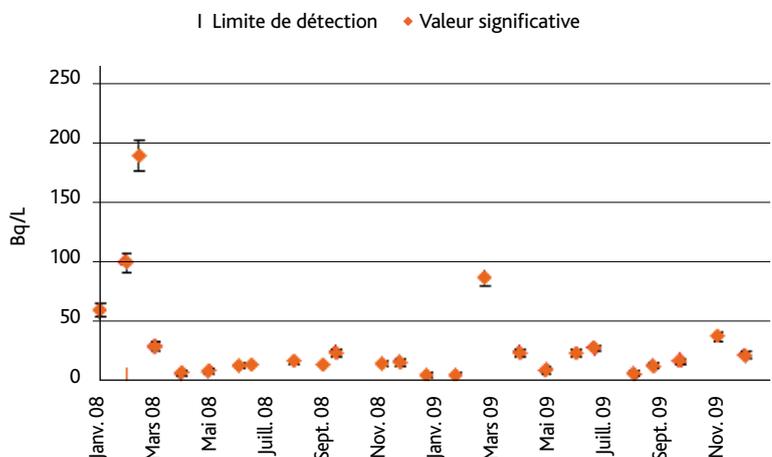


FIGURE V.8 Évolution de l'activité en ³H mesurée dans les eaux de pluie depuis 2008 à proximité du centre de Valduc.

COMPARTIMENT TERRESTRE
Sols, herbes et productions végétales

Des prélèvements d'herbe et de sols sont réalisés semestriellement dans l'environnement proche du centre de Saclay et à Gif-sur-Yvette. Outre la présence de potassium 40, les résultats d'analyses de ces prélèvements (Tableaux V.2 et V.3) indiquent la présence de césium 137 dans les sols ainsi que des traces de plutonium 239+240 à des niveaux d'activités du même ordre de grandeur que ceux observés sur l'ensemble du territoire. Ces marquages sont certainement imputables aux retombées passées des tirs atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl. La présence de traces de césium 134 mesurées dans le sol de Saclay, de strontium 90 et de tritium lié à la matière organique, à hauteur d'une vingtaine de Bq/kg frais mesurés dans l'herbe de Saclay, témoignent des rejets du centre.

Un marquage, bien que ténu, se retrouve également dans les activités en tritium mesurées dans les productions végétales cultivées à proximité du centre : pommes, framboises et laitues (Tableau V.4).

TABLEAU V.2 Activités moyennes (Bq/kg sec) mesurées dans les sols prélevés à proximité du centre CEA de Saclay.

| | | Gif-sur-Yvette | Saclay |
|------|--|----------------|-------------|
| Sols | ⁴⁰ K | 242 ± 33 | 374 ± 45 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,43 | < 0,61 |
| | ¹³⁴ Cs | < 0,54 | 0,70 ± 0,35 |
| | ¹³⁷ Cs | 2,98 ± 0,53 | 7,47 ± 1,04 |
| | Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ^{110m} Ag, ¹²⁵ Sb) | < 1,3 | < 1,9 |
| | ²⁴¹ Am | < 0,09 | < 0,18 |
| | ²³⁸ Pu | < 0,10 | < 0,11 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 0,10 ± 0,07 | < 0,24 |

TABLEAU V.3 Activités moyennes (Bq/kg sec)* mesurées dans l'herbe prélevée à proximité du centre CEA de Saclay.

| | | Gif-sur-Yvette | Saclay |
|-------|-----------------------------|----------------|-------------|
| Herbe | ⁴⁰ K | 935 ± 103 | 830 ± 60 |
| | ⁵⁴ Mn | < 1,49 | < 0,85 |
| | ⁶⁰ Co | < 1,44 | < 0,98 |
| | ⁹⁰ Sr | < 0,35 | 0,51 ± 0,07 |
| | ¹⁴ C | 238,8 ± 1,3 | 235,5 ± 1,3 |
| | ³ H lié | nm | 19,8 ± 1,0 |
| | ³ H libre (Bq/L) | 4,70 ± 1,97 | 5,85 ± 1,31 |

TABLEAU V.4 Activités (Bq/kg frais)* mesurées dans les productions végétales prélevées à proximité du centre CEA de Saclay.

| | | Jouy-en-Josas | | Saclay | |
|-----------------------|---|----------------|--------------|--------------|----------------|
| | | Carotte | Pomme | Framboise | Laitue |
| Productions végétales | ⁴⁰ K | 112,17 ± 13,14 | 34,39 ± 4,20 | 61,33 ± 6,13 | 129,53 ± 11,43 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,08 | < 0,08 | < 0,08 | 0,04 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,07 | < 0,07 | 0,03 | 0,08 ± 0,01 |
| | Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ^{110m} Ag, ¹²⁵ Sb, ¹³⁴ Cs) | < 0,17 | < 0,25 | 0,08 | 0,06 |
| | ³ H lié | nm | 4,63 ± 2,3 | 1,00 ± 0,06 | 0,18 ± 0,02 |
| | ³ H libre (Bq/L) | nm | | 6,8 ± 2,1 | 6,2 ± 2,05 |

*Sauf indication contraire
 nm : non mesuré

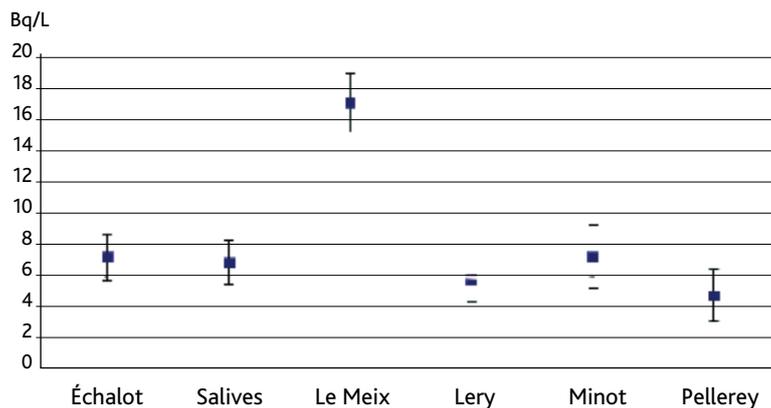


FIGURE V.9 Activité en ^3H libre (Bq/L d'eau) mesurée dans l'herbe prélevée en 2009 à six stations autour du centre de Valduc.

TABLEAU V.5 Activités (Bq/kg frais*) mesurées dans les productions végétales prélevées à proximité du centre CEA de Cadarache.

| Productions végétales | | Jouques | Vinon-sur-Verdon |
|-----------------------|---|---------------|--------------------|
| | | Thym | Persil |
| | ^{40}K | 720 ± 100 | $106,82 \pm 15,57$ |
| | ^{60}Co | $< 2,17$ | $< 0,44$ |
| | ^{137}Cs | $< 1,84$ | $< 0,34$ |
| | Autres émetteurs gamma (^{54}Mn , ^{58}Co , ^{110m}Ag , ^{134}Cs) | $< 2,48$ | $< 0,97$ |
| | ^3H libre (Bq/L) | $4,6 \pm 2,3$ | nm |

* Sauf indication contraire
nm : non mesuré

TABLEAU V.6 Activités moyennes (Bq/L) mesurées dans le lait prélevé en 2009 à proximité des centres CEA de Saclay, Cadarache et Bruyères-le-Châtel.

| Lait | | Saclay (Jouy-en-Josas) | Cadarache (maximums mesurés autour du centre) | Bruyères-le-Châtel (Cheptainville) |
|------|-------------------|------------------------|---|------------------------------------|
| | | Lait de vache | Lait de caprin | Lait de vache |
| | ^{40}K | $48,22 \pm 2,42$ | $62,4 \pm 3,0$ | nm |
| | ^{131}I | $< 1,14$ | $< 1,50$ | nm |
| | ^{134}Cs | $< 0,13$ | $< 0,20$ | nm |
| | ^{137}Cs | $< 0,15$ | $< 0,23$ | nm |
| | ^3H | $< 4,57$ | $< 4,9$ | $4,97 \pm 1,76$ |

nm : non mesuré

Le prélèvement d'herbe réalisé à Ollainville, à proximité du centre de Bruyères-le-Châtel, présente un marquage en tritium du même ordre que celui observé les années passées : $12,0 \pm 2,4$ Bq/L. Ce marquage est imputable aux rejets atmosphériques du centre de Bruyères-le-Châtel.

Autour du centre de Valduc, six échantillons d'herbes sont prélevés chaque semestre. Leur analyse en tritium révèle un marquage de l'herbe par les rejets atmosphériques du centre et plus particulièrement au Meix ($17,2 \pm 1,9$ Bq/L) (Figure V.9).

Les analyses réalisées sur des prélèvements de thym et de persil cultivés à proximité du centre de Cadarache n'ont révélé aucune activité anormale (Tableau V.5).

Lait

Les analyses de lait de vache prélevé à proximité du centre de Saclay et de lait de caprin prélevé autour du centre de Cadarache (Barjols, La Bastidonne, la Verdrière, Meyrargues, Rians et Saint-Julien) n'indiquent aucune activité artificielle au-dessus des limites de détection.

Le lait prélevé à proximité du centre de Bruyères-le-Châtel indique une très faible activité en tritium, qui est à mettre certainement en relation avec le marquage de l'herbe dû aux rejets de ce site (Tableau V.6).

La surveillance du lait produit autour du centre de Valduc porte sur l'analyse de trois prélèvements réalisés à Échalot, Frenois et Salives. Elle fait ressortir un marquage du lait en tritium rejeté par le centre du CEA, notamment à Salives et à Échalot (Figure V.10). Les activités des autres radionucléides sont inférieures aux limites de détection, en dehors du potassium 40 dont les activités sont du même ordre que celles mesurées sur l'ensemble du territoire français (43,6 à 48,0 Bq/L).

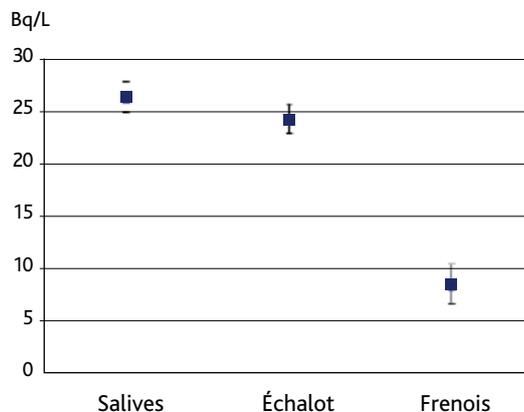


FIGURE V.10 Activité en ^3H total (Bq/L) mesurée dans le lait prélevé autour du centre de Valduc en 2009.

Animal

Deux prélèvements de viande ont été réalisés à proximité du centre de Cadarache. En dehors du potassium 40 présent naturellement, les analyses révèlent des traces de tritium libre et de césium 137 dans des gammes d'activités identiques à celles d'échantillons non influencés par les rejets d'un site nucléaire. (Tableau V.7).

COMPARTIMENT AQUATIQUE CONTINENTAL

Eau

Le tritium est régulièrement mesuré dans les eaux de surface et de résurgence, prélevées à proximité des sites de Saclay, de Bruyères-le-Châtel et de Valduc.

Dans l'environnement du CEA de Valduc, les cours d'eau, qui coulent au nord et à l'est de ce site (le Brévon et la Digeanne), sont situés sous les vents dominants du site. De ce fait, la contamination en tritium de ces cours d'eau est probablement due en partie aux rejets atmosphériques de tritium par le centre de Valduc.

À l'ouest du site, hors de la zone des vents dominants, aucune valeur n'a été détectée au-dessus de notre limite de détection, dans le Prélard, le Revinson et la Seine.

Au sud du site, les eaux de la Douix à Léry sont marquées en tritium probablement pour les mêmes raisons indiquées précédemment. En revanche, l'Ignon, qui reçoit les eaux de la Douix ($28,7 \pm 2,6$ Bq/L), qui a elle-même reçu les eaux du ruisseau Le Noirveau (environ 189 ± 9 Bq/L en tritium) en aval de Léry, présente une activité en tritium de l'ordre de 26 ± 2 Bq/L au niveau de Moly, principalement due à ses affluents. À proximité immédiate du site, le Grand étang du CEA de Valduc présente une activité de 230 Bq/L (Figure V.11).

L'influence très probable du marquage en tritium de certains cours d'eau par les nappes phréatiques, elles-mêmes alimentées par des infiltrations d'eau de pluie marquées en tritium, est confirmée par les mesures réalisées sur des eaux de résurgences de nappes. Comme les années antérieures, des concentrations significatives sont mesurées en 2009 dans les eaux de quelques sources (Figure V.12).

TABLEAU V.7 Activités (Bq/kg frais*) mesurées dans la viande de porc prélevée en 2009 à proximité du centre CEA de Cadarache.

| | | Montferrat | Saint-Paul-lez-Durance |
|--------|--|---------------|------------------------|
| Viande | ⁴⁰ K | 83,71 ± 10,54 | 105,57 |
| | ⁶⁰ Co | < 1,49 | < 1,60 |
| | ¹³⁷ Cs | 1,13 ± 0,26 | 0,32 ± 0,10 |
| | Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ^{110m} Ag, ¹³⁴ Cs) | < 0,80 | < 0,60 |
| | ³ H libre (Bq/L) | 4,70 ± 2,35 | 5,30 ± 0,27 |

* Sauf indication contraire

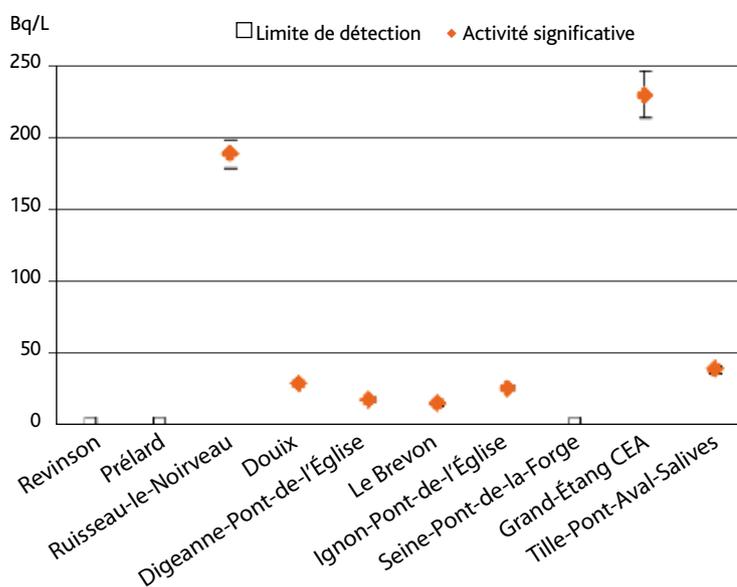


FIGURE V.11 Activités moyennes du tritium (Bq/L) mesurées dans les eaux de surface en 2009 à proximité du CEA de Valduc.

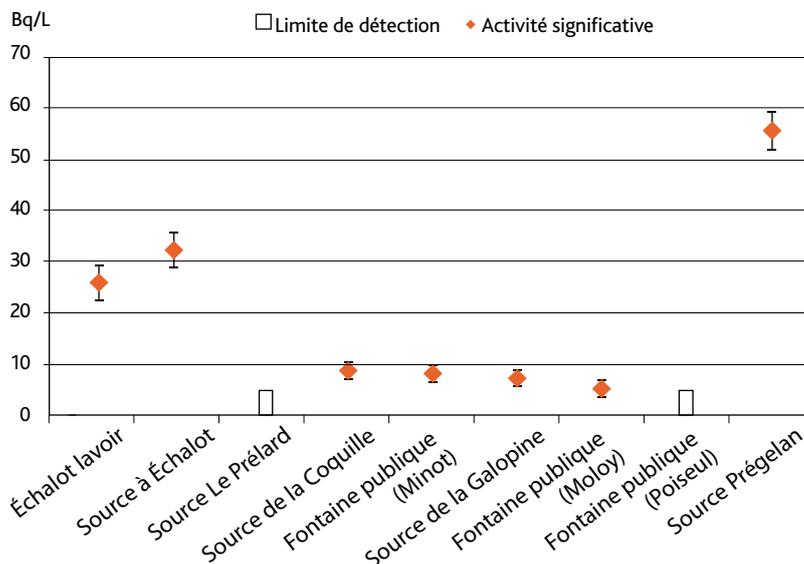


FIGURE V.12 Activités moyennes du tritium (Bq/L) mesurées dans les résurgences de nappe phréatique en 2009 à proximité du CEA de Valduc.

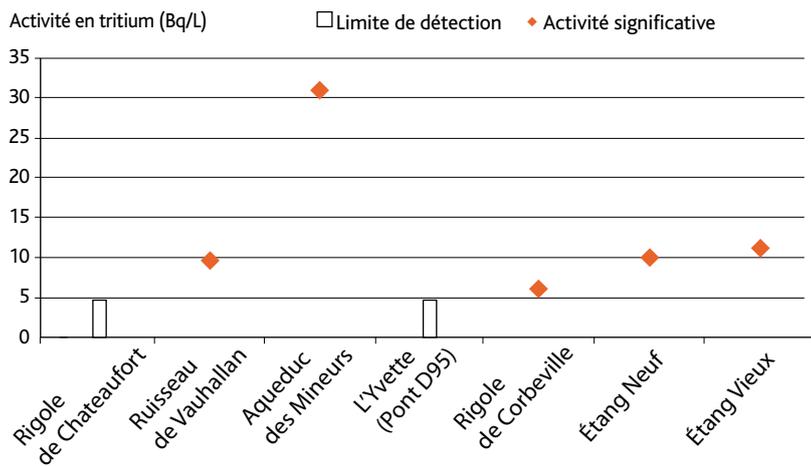


FIGURE V.13 Activités maximales en tritium observées en 2009 dans les eaux de surface à proximité du CEA de Saclay.

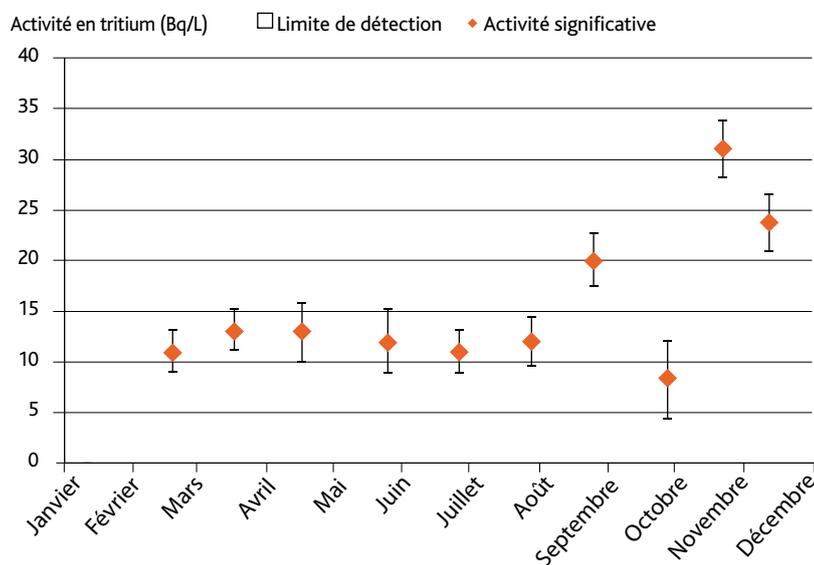


FIGURE V.14 Activité en tritium mesurée en 2009 dans les eaux de surface en aval hydraulique du CEA de Saclay dans l'aqueduc des Mineurs.

TABLEAU V.9 Activités (Bq/L) mesurées dans les eaux de surface et dans les résurgences prélevées en 2009 à proximité du CEA de Bruyères-le-Châtel.

| | Point de prélèvement | Activité moyenne (Bq/L) |
|-----------------|---|-------------------------|
| Eaux de surface | Rémarde à Ollainville | < 4,9 |
| | Orge à Villemoisson | < 4,72 |
| | La Rémarde | < 5,4 |
| | Bassin de retenue de l'Orge | < 4,81 |
| | Ruisseau Le Grand Rué | 22 ± 3,1 |
| | Mare-la-Fosse (lieu-dit La Roche) | < 7,5 |
| | Place du Lavoir | 30,4 ± 2 |
| | Mare-la-Fosse - Grande Rue, près de l'école | < 4,6 |

Pour le CEA de Saclay (Figure V.13 et Tableau V.8), un certain nombre de points de prélèvements, situés à proximité de ce site, présentent des niveaux d'activité moyens en tritium, compris entre 8,8 et 14,4 Bq/L, qui témoignent d'un marquage par les rejets liquides et gazeux du site. Il s'agit de l'Étang Vieux, l'Étang Neuf, le ruisseau de Vauhallan, la source Le Billehou et en particulier l'aqueduc des Mineurs qui atteint, en 2009, une activité maximale de 31 Bq/L.

La Figure V.14 présente la chronique des valeurs du tritium mesurées en 2009 en aval hydraulique du CEA de Saclay, au niveau de l'aqueduc des Mineurs qui reçoit certains effluents du site. Ces valeurs sont conformes à celles observées habituellement.

TABLEAU V.8 Activités moyennes (Bq/L) mesurées dans les eaux de surface et dans les résurgences prélevées en 2009 à proximité du CEA de Saclay.

| | Point de prélèvement | Activité moyenne (Bq/L) |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Eaux de surface | Amont : rigole de Chateaufort | < 4,65 |
| | Ruisseau de Vauhallan | 8,8 ± 1,5 |
| | Aqueduc des mineurs | 14,4 ± 0,76 |
| | L'Yvette (Pont D95) | < 4,56 |
| | Rigole de Corbeville | 4,9 ± 1,7 |
| | Étang Neuf | 8,9 ± 1,5 |
| | Étang Vieux | 10 ± 1,6 |
| Eaux de résurgence | Source Le Billehou | 9,1 ± 1,5 |
| | Lavoir de Vauhallan | 5,6 ± 1,7 |

À Bruyères-le-Châtel, les activités en tritium mesurées dans les eaux prélevées dans le ruisseau Le Grand Rué (22 Bq/L) et à la place du Lavoir (30,4 Bq/L) sont attribuables aux rejets gazeux du site (Tableau V.9).

TABLEAU V.10 Activités moyennes mesurées dans des eaux prélevées en 2009 en amont et en aval des CEN du CEA (Bq/L).

| | Site | Point de prélèvement | ¹³⁷ Cs | ⁹⁰ Sr |
|-----------------|--------------------|-----------------------|-------------------|------------------|
| Eaux de surface | Cadarache | Durance aval du CEA | < 0,07 | nm |
| | | Isère amont du CEA | nm | nm |
| | Grenoble | Isère aval du CEA | nm | nm |
| | | Drac aval du CEA | nm | nm |
| | Bruyères-le-Châtel | Rigole de Chateaufort | < 0,07 | 0,0073 ± 0,0017 |
| | | Ruisseau de Vauhalla | < 0,07 | 0,0041 ± 0,0014 |
| | | Rémarde à Ollainville | < 0,07 | nm |
| | | Orge à Villemoisson | < 0,07 | < 0,004 |
| | | Ruisseau Le Grand Rué | nm | nm |
| | Saclay | Aqueduc des Mineurs | < 0,07 | 0,0045 ± 0,00068 |
| | | L'Yvette | < 0,07 | < 0,006 |
| | | Rigole de Corbeville | < 0,07 | < 0,004 |
| | | Étang Neuf | < 0,07 | 0,0057 ± 0,0015 |
| Étang Vieux | | < 0,07 | 0,0072 ± 0,0026 | |

nm : non mesuré

TABLEAU V.11 Activités mesurées dans les sédiments prélevés en 2009 à proximité du site de Bruyères-le-Châtel (Bq/kg sec).

| | Radionucléide | Ruisseau Le Grand Rué | La Rémarde |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| Sédiments de rivière | ⁵⁴ Mn | < 0,60 | 0,97 |
| | ⁵⁸ Co | < 1,28 | 1,16 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,51 | 0,50 |
| | ¹³⁷ Cs | 1,40 ± 0,65 | 2,50 ± 0,51 |
| | ²³⁸ Pu | 0,16 ± 0,06 | 0,14 |
| | ²⁴¹ Am | 0,26 ± 0,08 | 0,25 ± 0,11 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | < 2,17 | 1,29 ± 0,23 |

TABLEAU V.12 Évolution des ratios ²³⁴U/²³⁸U mesurés dans les sédiments prélevés en 2009 à proximité du site de Bruyères-le-Châtel.

| | Année | Le Grand Rué | La Rémarde |
|----------------------|-------|--------------|------------|
| Sédiments de rivière | 2008 | 0,940 | 1,03 |
| | 2009 | 0,928 | 0,980 |

Autres radionucléides

Pour l'ensemble des sites, les activités des radionucléides émetteurs gamma ainsi que les indices alpha global et bêta global, ne présentent aucune valeur anormale par rapport aux activités habituellement mesurées (Tableau V.10).

À Saclay, dans les eaux de l'aqueduc des Mineurs, de l'Étang Neuf et l'Étang Vieux, le ⁹⁰Sr est détecté avec une activité comprise entre 0,0045 et 0,0072 Bq/L (Tableau V.10). Ces activités sont à mettre en relation avec les rejets autorisés du centre en strontium 90, essentiellement rejeté par les installations de CIS-Bio international.

À Bruyères-le-Châtel, les traces de ⁹⁰Sr détectables dans la rigole de Chateaufort (0,0073 Bq/L) et le ruisseau de Vauhalla (0,0041 Bq/L), sont dues aux rejets historiques du site CEA (Tableau V.10).

Sédiments

Bruyères-le-Châtel

L'environnement de ce centre a fait l'objet en 2008, d'une campagne de prélèvements exploratoire afin d'examiner les niveaux de radioactivité présents dans les sédiments des cours d'eau et plans d'eau. Deux points de prélèvements ont été retenus pour assurer la surveillance de routine du site, dans la Rémarde et le ruisseau Le Grand Rué.

La présence de radionucléides émetteurs gamma et de transuraniens tels que le plutonium 239+240 et l'américium 241 sont imputables aux rejets d'effluents liquides passés (Tableau V.11).

Tout comme en 2008, les rapports isotopiques des uraniums mesurés en 2009, proches de 1, témoigneraient de la présence d'uranium d'origine naturelle. (Tableau V.12).

Cadarache

Des prélèvements biannuels de sédiments sont réalisés dans la Durance, à Saint-Paul-lez-Durance, à 400 mètres en aval du point de rejets d'effluents liquides.

Parmi les radionucléides d'origine artificielle recherchés, seules des traces de césium 137 sont détectées. La valeur moyenne annuelle en 2009 pour ce radionucléide, de 3,44 Bq/kg sec, est du même ordre de grandeur que les niveaux observés les années précédentes. 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). Les résultats des mesures des autres radionucléides sont tous restés inférieurs aux limites de détection précisées ci-contre (Tableau V.13).

Les transuraniens ²³⁹⁺²⁴⁰Pu sont détectés ponctuellement à une activité moyenne de 0,14 Bq/kg sec. Cette valeur est très proche de la limite de détection et pourrait être liée aux rejets du site de Cadarache.

Grenoble

Des prélèvements trimestriels de sédiments sont réalisés dans l'Isère au niveau du barrage de Saint-Égrève situé en aval du site CEA de Grenoble. Les principaux résultats sont reportés dans le Tableau V.14.

Le césium 137 est décelable dans l'ensemble des prélèvements, à des niveaux comparables à ceux mesurés dans le Rhône, hors influence des rejets des installations nucléaires. Sa présence dans l'Isère en aval du CEN de Grenoble est donc principalement liée aux retombées atmosphériques passées (accident de Tchernobyl et tirs aériens d'armes nucléaires). Des traces de ²³⁹⁺²⁴⁰Pu ont ponctuellement été décelées.

Saclay

Des prélèvements trimestriels de sédiments sont réalisés dans l'Étang Vieux, milieu récepteur des rejets d'effluents liquides du centre de Saclay, qui transitent via l'aqueduc des Mineurs. Le Tableau V.15 présente les activités des radionucléides émetteurs gamma détectés en 2009.

Pour ce qui concerne les radionucléides d'origine artificielle, on observe un marquage rémanent des sédiments par le strontium 90, le césium 137, le cobalt 60, le plutonium et l'américium 241.

Le strontium 90 pourrait être attribué aux rejets actuels de CIS-Bio International et passés du CEA de Saclay.

TABLEAU V.13 Activités moyennes mesurées dans les sédiments prélevés en 2009 dans la Durance à Saint-Paul-lez-Durance (Bq/kg sec).

| | Radionucléide | Activité |
|----------------------|-----------------------|----------------|
| Sédiments de rivière | ⁴⁰ K | 429,74 ± 28,35 |
| | ¹³⁷ Cs | 3,44 ± 0,40 |
| | ²⁴¹ Am | < 0,02 |
| | ²³⁸ Pu | < 0,09 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 0,14 ± 0,05 |

TABLEAU V.14 Activités moyennes mesurées dans les sédiments prélevés en 2009 dans l'Isère à Saint-Égrève (Bq/kg sec).

| | Radionucléide | Activité |
|----------------------|-----------------------|----------------|
| Sédiments de rivière | ⁴⁰ K | 666,65 ± 30,80 |
| | ¹³⁷ Cs | 5,13 ± 0,38 |
| | ²⁴¹ Am | < 0,19 |
| | ²³⁸ Pu | < 0,12 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 0,16 ± 0,04 |

TABLEAU V.15 Activités moyennes mesurées dans des sédiments prélevés en 2009 dans l'Étang Vieux à Saclay (Bq/kg sec).

| | Radionucléide | Activité |
|----------------------|-----------------------|----------------|
| Sédiments de rivière | ⁴⁰ K | 287,40 ± 29,19 |
| | ⁶⁰ Co | 0,87 ± 0,23 |
| | ⁹⁰ Sr | 1,66 ± 0,21 |
| | ¹³⁷ Cs | 1,19 ± 0,34 |
| | ²⁴¹ Am | 0,32 ± 0,08 |
| | ²³⁸ Pu | 0,14 ± 0,05 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 0,24 ± 0,09 |

Le marquage en césium 137, cobalt 60, plutonium et américium 241 est imputable en partie aux rejets d'effluents liquides passés du site et principalement au pic de pollution survenu en 1990 (chroniques de concentration présentées page 151 dans le *Bilan radiologique* 2007). La concentration moyenne annuelle de ces radionucléides a fortement décru depuis (à titre d'exemple, l'activité en césium 137 a été réduite d'un facteur 100 depuis 1990).

Végétaux aquatiques

Les marquages observés dans les sédiments de l'Étang Vieux de Saclay dus aux rejets passés et présents du centre d'études se retrouvent dans les végétaux aquatiques prélevés à l'aqueduc des Mineurs : américium, isotopes du plutonium, césium 137, strontium 90 auxquels s'ajoute un léger marquage en tritium (Tableau V.16).

TABLEAU V.16 Activités mesurées dans des végétaux aquatiques prélevés en 2009 à Saclay (Bq/kg sec*).

| | Radionucléide | Saclay aqueduc des Mineurs (Roseau) |
|---------------------|--|--|
| Végétaux aquatiques | ⁴⁰ K | 1 300,0 ± 138,7 |
| | ⁶⁰ Co | < 1,10 |
| | ⁹⁰ Sr | 1,24 ± 0,17 |
| | ¹³⁷ Cs | 4,90 ± 0,86 |
| | Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ¹³¹ I, ^{110m} Ag, ¹²⁴ Sb, ¹³⁴ Cs) | < 2,14 |
| | ²⁴¹ Am | 0,02 ± 0,01 |
| | ²³⁸ Pu | 0,03 ± 0,01 |
| | ²⁴¹ Pu | < 2,40 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 0,18 ± 0,03 |
| | ³ H lié | < 33,4 |
| | ³ H libre (Bq/L) | 9,40 ± 1,53 |
| | ¹⁴ C (Bq/kg C) | 285,50 ± 1,30 |

* Sauf indication contraire

V.2 LES CENTRES DE RECHERCHE INTERNATIONAUX

INSTITUT LAUE-LANGEVIN – GRENOBLE (38)

L'Institut Laue-Langevin (ILL), fondé en 1967 sous l'impulsion de l'Allemagne, de la France et du Royaume-Uni, avait pour objectif de concevoir une source de neutrons (réacteur à haut flux) très intense entièrement dédiée à la recherche fondamentale civile. L'ILL est un organisme de recherche international, leader mondial en sciences et techniques neutroniques, implanté sur le polygone scientifique de Grenoble. Plus de 800 expériences y sont effectuées chaque année, et environ 1 500 chercheurs viennent y réaliser leurs programmes, sélectionnés par un comité scientifique.

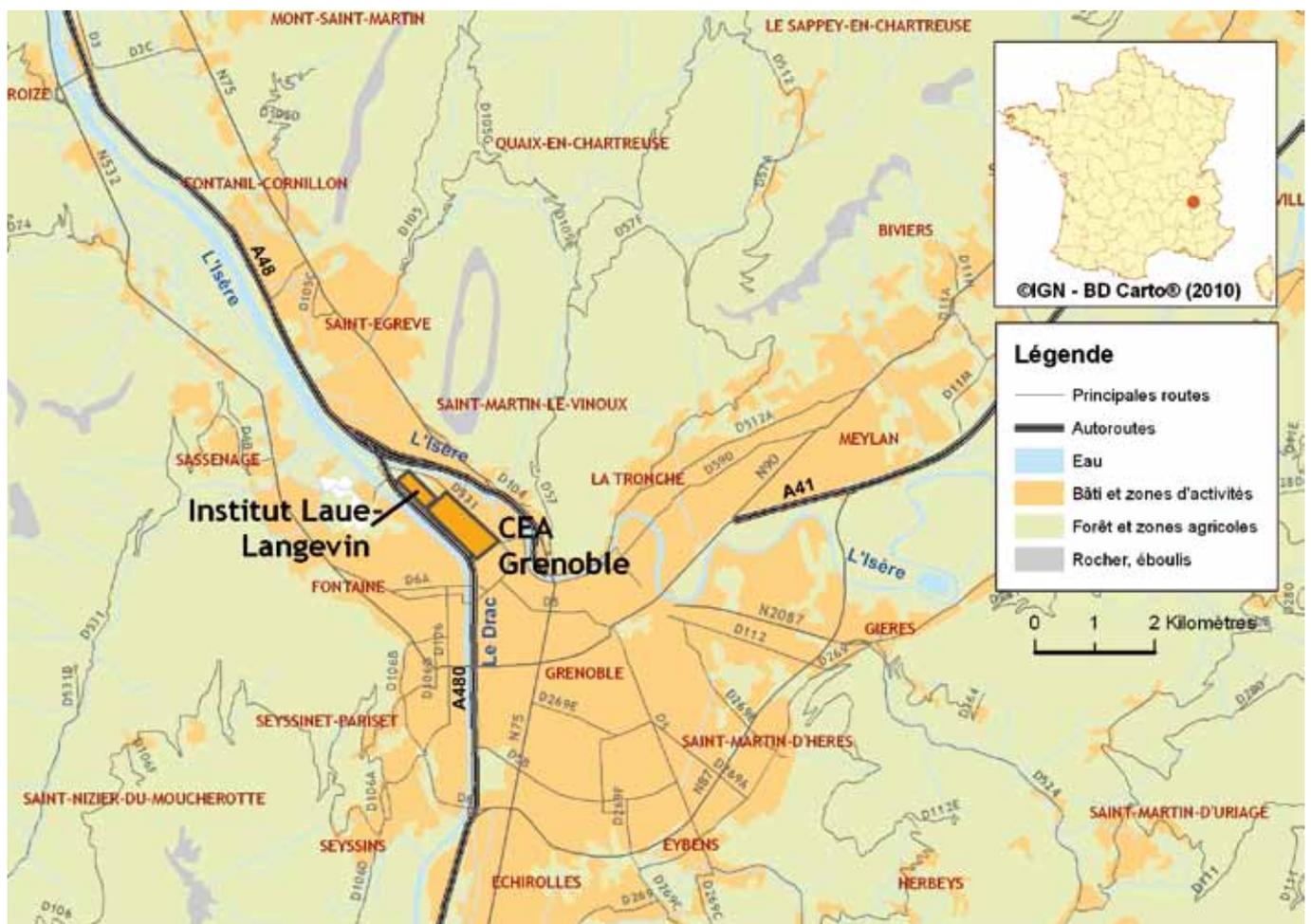


FIGURE V.15 Implantation du site CEA et de l'ILL à Grenoble.

Compartiment atmosphérique

Les eaux de pluie collectées à une fréquence hebdomadaire sur le site du CEA de Grenoble ont montré la présence ponctuelle de tritium, l'activité moyenne en 2009 s'élevant à $5,11 \pm 0,71$ Bq/L, proche de la limite de détection du tritium.

Compartiment terrestre

Les analyses de blettes et de lait prélevés à proximité du centre CEA et de l'ILL à Grenoble n'ont révélé aucune activité artificielle anormale (Tableau V.17).

Compartiment aquatique

La surveillance de ce site est, pour l'instant, limitée à l'eau du Drac. Aucune activité anormale n'a été décelée dans les eaux prélevées à proximité de l'Institut.

TABLEAU V.17 Activités mesurées dans les productions végétales (Bq/kg frais) et le lait de vache (Bq/L) prélevés à proximité de l'ILL.

| | Unité | Blettes | Lait |
|-------------------------------|--|---------------|------------|
| | | Bq/kg frais | Bq/L |
| Productions végétales et lait | ⁴⁰ K | 133,17 ± 9,41 | 48,7 ± 2,4 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,06 | nm |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,05 | < 0,18 |
| | Autres émetteurs gamma (⁵⁴ Mn, ^{110m} Ag, ¹²⁴ Sb, ¹³⁴ Cs) | < 0,09 | < 0,15 |
| | ³ H libre (Bq/L) | 4,5 ± 2,25 | < 4,6 |
| | ¹⁴ C | 234,2 ± 1,3 | nm |

nm : non mesuré

CERN - PRÉVESSIN (01)

L'organisation européenne pour la recherche nucléaire communément désignée par l'abréviation CERN, est une institution intergouvernementale européenne créée par la convention signée à Paris le 1^{er} juillet 1953 et révisée depuis. Le CERN est situé sur les territoires suisse et français. La partie française est située sur la commune de Prévessin. Le CERN utilise principalement des accélérateurs d'électrons, positrons, protons et ions lourds. La circulation des particules accélérées et les collisions entre les particules et les cibles génèrent des rayonnements de haute énergie qui peuvent activer les matériaux qu'ils traversent. Le tritium figure parmi les produits d'activation. Quelques structures sont construites en uranium appauvri.

La surveillance du site du CERN consiste en l'analyse de filtres aérosols, d'eau de pluie et d'eau souterraine.

Compartiment atmosphérique

Aucune activité anormale n'a été décelée sur les filtres aérosols prélevés quotidiennement à la station AS1, sous les vents dominants du centre de recherche.

L'analyse des eaux de pluie recueillies dans l'environnement français du CERN à un rythme mensuel n'a révélé aucune activité anormale (Tableau V.18).

Compartiment aquatique continental

Des prélèvements d'eau effectués semestriellement dans un piézomètre proche du centre n'ont révélé aucune activité anormale (Tableau V.19).

TABLEAU V.18 Activités moyennes (Bq/L) mesurées dans des eaux de pluie prélevées en 2009 à proximité du CERN.

| | Radionucléide | Activité moyenne (Bq/L) |
|---------------|--------------------|-------------------------|
| Eaux de pluie | ³ H | < 4,9 |
| | Bêta global | 0,096 ± 0,013 |

TABLEAU V.19 Activités moyennes (Bq/L) mesurées dans des eaux de nappe prélevées en 2009 à proximité du CERN.

| | Point de prélèvement | Radionucléide | Activité moyenne (Bq/L) |
|---------------|----------------------|--------------------|-------------------------|
| Eaux de nappe | Forage | ³ H | < 4,5 |
| | | Bêta global | 0,3422 ± 0,051 |

V.3 LES BASES NAVALES NUCLÉAIRES

Trois ports militaires de métropole abritent des bases navales nucléaires. Ces installations nucléaires présentent la spécificité d'être intégrées au sein d'agglomérations importantes (Toulon : 400 000 hab., Brest : 200 000 hab., Cherbourg : 80 000 hab.). De plus, ces ports s'ouvrent sur des rades qui constituent des écosystèmes sensibles.

Comme toute installation, 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.

En parallèle, des analyses de radioactivité sont également effectuées par l'IRSN, sur des échantillons prélevés par la DGAL et l'IRSN (eau de mer, sédiments, poissons, mollusques, crustacés et algues).

BREST (29)

Eaux de mer

La surveillance des eaux de mer prélevées chaque trimestre dans la grande rade de Brest en 2009 n'a permis de détecter aucune activité d'origine artificielle au-dessus des limites de détection (Tableau V.20).

Sédiments

Des prélèvements semestriels de sédiments sont effectués au niveau de l'Anse du Fret, située dans la grande rade de Brest. Les résultats sont présentés ci-contre (Tableau V.21).

Parmi les radionucléides d'origine artificielle mesurés, seules des traces de césium 137 sont détectées.

Faune et flore marines

Des prélèvements annuels de poissons, mollusques, crustacés et algues sont effectués en différents points de la grande rade de Brest.

Algues

La radioactivité d'origine naturelle mesurée dans les algues est principalement due au potassium 40 (250 Bq/kg frais). Les activités des radionucléides d'origine artificielle recherchés (¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ⁶⁰Co, ⁵⁸Co, ¹³¹I, ¹⁰⁶Ru...) sont restées inférieures aux limites de détection ($\approx 0,2$ Bq/kg frais) (Tableau V.22).

Mollusques, crustacés et poissons

Aucun des radionucléides d'origine artificielle recherchés (émetteur gamma, strontium 90) n'a été mis en évidence dans les échantillons (Tableau V.23) :

- de moules prélevées à la pointe de Lanvéoc ;
- d'huîtres prélevées à Logonna-Daoulas ;
- de tourteaux provenant de la rade-abri ;
- de poissons : congres provenant de la rade-abri, roussettes et autres poissons provenant de la bouée du Renard, soles provenant de Plougastel-Daoulas.

TABLEAU V.20 Activités moyennes mesurées dans des eaux de mer prélevées en 2009 dans la grande rade de Brest (Bq/L).

| | Point de prélèvement | Radionucléide | Activité moyenne (Bq/L) |
|-------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| Eaux de mer | Anse du Fret | ¹³⁷ Cs | < 0,02 |
| | | ³ H | < 4,9 |
| | | ⁴⁰ K | 12,12 ± 0,53 |
| | | Bêta global | 11,05 ± 0,58 |

TABLEAU V.21 Activités moyennes mesurées dans des sédiments prélevés en 2009 dans la grande rade de Brest (Bq/kg sec).

| | Radionucléide | Activité massique |
|-----------|--|-------------------|
| Sédiments | ⁴⁰ K | 341 ± 16 |
| | ⁷ Be | 8,6 ± 2,9 |
| | ¹³⁷ Cs | 1,2 ± 0,34 |
| | ⁹⁰ Sr | < 1,1 |
| | Autres émetteurs gamma (¹³⁴ Cs, ⁶⁰ Co, ⁵⁴ Mn) | < 0,5 |

TABLEAU V.22 Activités moyennes mesurées dans des algues (en Bq/kg frais) prélevées en 2009 dans la grande rade de Brest.

| | Radionucléide | Fucus/serratus |
|--------|--|----------------|
| Algues | ⁴⁰ K | 250 ± 26 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,16 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,17 |
| | ⁹⁰ Sr | < 0,22 |
| | Autres émetteurs gamma (¹³⁴ Cs, ⁵⁸ Co, ⁵⁴ Mn) | < 0,20 |

TABLEAU V.23 Activités moyennes mesurées dans des mollusques, crustacés et poissons prélevés en 2009 dans la grande rade de Brest (Bq/kg frais).

| | Radionucléide | Moules | Huîtres | Tourteaux | Poissons |
|---------------------------------|--|------------|------------|-----------|----------|
| Mollusques, crustacés, poissons | ⁴⁰ K | 32,2 ± 3,7 | 31,8 ± 4,8 | 105 ± 19 | 113 ± 25 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,10 | < 0,12 | < 0,43 | < 0,25 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,10 | < 0,14 | < 0,43 | < 0,26 |
| | ¹⁰⁶ Ru | < 0,92 | < 1,5 | < 4,6 | < 2,7 |
| | ⁹⁰ Sr | < 0,04 | < 0,04 | < 0,07 | < 0,12 |
| | Autres émetteurs gamma (¹³⁴ Cs, ⁵⁸ Co, ⁵⁴ Mn) | < 0,3 | < 0,2 | < 0,50 | < 0,90 |

CHERBOURG (50)

Eaux de mer

Les analyses des eaux de mer prélevées chaque trimestre dans la grande rade de Cherbourg n'ont permis de détecter aucun radionucléide d'origine artificielle, sauf le tritium qui, comme en 2007 et 2008, présente en 2009 des activités significatives imputables aux rejets liquides de l'usine de La Hague (Tableau V.24).

Sédiments

Des prélèvements trimestriels de sédiments marins sont effectués à La Saline dans la grande rade de Cherbourg (Tableau V.25).

La radioactivité naturelle est majoritairement due au potassium 40 (347 Bq/kg sec). En ce qui concerne la radioactivité d'origine artificielle, il faut noter le léger marquage en émetteurs alpha (^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$), du même ordre de grandeur que celui observé en 2008. Ce marquage, visible sur le littoral du Cotentin, est imputable aux rejets d'effluents liquides passés et actuels de l'usine de retraitement du combustible du site AREVA La Hague.

Faune et flore marines

Des prélèvements annuels d'algues, mollusques, crustacés et poissons sont effectués en différents points de la grande rade de Cherbourg.

Algues

Les activités relevées dans les échantillons de *Fucus serratus* et dans les ulves prélevés à La Saline sont comparables et du même ordre de grandeur que celles observées en 2008. Ces algues sont marquées par des radionucléides d'origine artificielle (^{60}Co , ^{129}I , ^{137}Cs , Pu et ^{241}Am – Tableau V.26) caractéristiques des rejets d'effluents liquides de l'usine de retraitement du combustible du site de La Hague. Les activités en tritium organiquement lié à la matière organique (OBT) mesurées dans les algues sont faibles, celles pour le tritium libre ne sont pas quantifiables. Un léger marquage en carbone 14 est observé dans les deux espèces d'algues.

TABLEAU V.24 Activités moyennes mesurées dans des eaux de mer prélevées en 2009 dans la grande rade de Cherbourg (Bq/L).

| | Point de prélèvement | Radionucléide | Activité moyenne (Bq/L) |
|-------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|
| Eaux de mer | Digue de Querqueville | ^{137}Cs | < 0,02 |
| | | Tritium | 5,8 ± 1,2 |
| | | ^{40}K | 11,98 ± 0,53 |
| | | Bêta global | 11,05 ± 0,6 |

TABLEAU V.25 Activités moyennes mesurées dans des sédiments prélevés en 2009 dans la grande rade de Cherbourg (Bq/kg sec).

| | Radionucléide | Activité massique |
|-----------|-----------------------|-------------------|
| Sédiments | ^{40}K | 347 ± 19 |
| | ^7Be | 3,7 ± 1,2 |
| | ^{60}Co | < 0,55 |
| | ^{137}Cs | 0,54 ± 0,17 |
| | ^{106}Ru | < 4,3 |
| | ^{238}Pu | 0,14 ± 0,04 |
| | $^{239+240}\text{Pu}$ | 0,22 ± 0,06 |
| | ^{241}Am | 0,42 ± 0,09 |

TABLEAU V.26 Activités moyennes mesurées dans des algues (en Bq/kg frais*) prélevées en 2009 dans la grande rade de Cherbourg.

| | Radionucléide | <i>Fucus serratus</i> | Ulves |
|--------|--|-----------------------|---------------|
| Algues | ^{40}K | 85,9 ± 9,6 | 34,9 ± 4,1 |
| | ^{60}Co | 0,144 ± 0,068 | 0,100 ± 0,050 |
| | ^{137}Cs | 0,092 ± 0,048 | < 0,06 |
| | ^{238}Pu | 0,007 ± 0,002 | 0,002 ± 0,001 |
| | $^{239+240}\text{Pu}$ | 0,018 ± 0,003 | 0,010 ± 0,002 |
| | ^{241}Am | 0,015 ± 0,003 | 0,006 ± 0,002 |
| | ^{129}I | 0,36 ± 0,16 | 0,106 ± 0,052 |
| | Autres émetteurs gamma (^{134}Cs , ^{58}Co , ^{54}Mn) | < 0,25 | 0,25 |
| | ^3H libre (Bq/L) | < 4,6 | < 6,0 |
| | ^3H lié | 0,433 ± 0,090 | 0,282 ± 0,080 |
| | ^{14}C (Bq/kg de C) | 353,7 ± 2,0 | 355,2 ± 2,0 |

* Sauf indication contraire

TABLEAU V.27 Activités moyennes mesurées dans des mollusques prélevés en 2009 dans la grande rade de Cherbourg (Bq/kg frais).

| | Radionucléide | Activité massique |
|-------------------------|---|-------------------|
| Coquilles Saint-Jacques | ⁴⁰ K | 63,0 ± 5,0 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,22 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,09 |
| | ²³⁸ Pu | 0,009 ± 0,003 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 0,022 ± 0,005 |
| | ²⁴¹ Am | 0,017 ± 0,004 |
| | Autres émetteurs gamma (¹³⁴ Cs, ⁵⁸ Co, ⁵⁴ Mn) | < 0,13 |

TABLEAU V.28 Activités moyennes mesurées dans des crustacés prélevés en 2009 dans la grande rade de Cherbourg (Bq/kg frais).

| | Radionucléide | Araignées de mer | Tourteaux |
|-----------|---|------------------|-----------|
| Crustacés | ⁴⁰ K | 31,5 ± 4,0 | 89 ± 12 |
| | ⁶⁰ Co | 0,08 ± 0,02 | < 0,18 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,2 | < 0,16 |
| | ²³⁸ Pu | < 0,008 | < 0,003 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 0,009 ± 0,005 | < 0,003 |
| | ²⁴¹ Am | 0,015 ± 0,008 | nm |
| | Autres émetteurs gamma (¹³⁴ Cs, ⁵⁸ Co, ⁵⁴ Mn) | < 0,06 | < 1,1 |

nm : non mesuré

TABLEAU V.29 Activités moyennes mesurées (Bq/kg frais)* dans des poissons prélevés en 2009 dans la grande rade de Cherbourg.

| | Radionucléide | Vieilles | Carrelets |
|----------|---|-------------|---------------|
| Poissons | ⁴⁰ K | 308 ± 36 | 86 ± 29 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,54 | < 0,08 |
| | ¹³⁷ Cs | 0,41 ± 0,21 | 0,13 ± 0,10 |
| | Autres émetteurs gamma (¹³⁴ Cs, ⁵⁸ Co) | < 4,0 | < 0,3 |
| | ²³⁸ Pu | < 0,003 | < 0,003 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | < 0,003 | 0,006 ± 0,003 |
| | ²⁴¹ Am | < 0,005 | < 0,006 |
| | ³ H libre (Bq/L) | < 5 | < 4,5 |
| | ¹⁴ C (Bq/kg de C) | 422,7 ± 2 | 273,2 ± 1,3 |

* Sauf indication contraire

Mollusques

Des traces de radionucléides transuraniens d'origine artificielle, caractéristiques (plutonium et américium) des rejets d'effluents liquides du site de La Hague, sont également décelables dans la chair des coquilles Saint-Jacques prélevées dans la grande rade de Cherbourg. Les valeurs moyennes, présentées dans le Tableau V.27, sont du même ordre de grandeur que celles mesurées en 2008. Les résultats des autres radionucléides mesurés sont restés inférieurs à nos limites de détection.

Crustacés

Des traces de cobalt 60, de plutonium 239+240 et d'américium 241, caractéristiques des rejets d'effluents liquides du site de La Hague, sont décelées dans les araignées de mer prélevées au centre de marée de Cherbourg. Les niveaux atteints sont faibles et proches des limites de détection. En dehors du potassium 40, aucune valeur significative n'est décelée dans les échantillons de chair de crabe prélevés en 2009 dans la grande rade de Cherbourg (Tableau V.28).



FIGURE V.16 Photo de traitement de carrelet en vue d'analyse radiologique.

Poissons

Les poissons sont pêchés dans les zones dites de Nacqueville (vieilles) et zone 5 de la grande rade de Cherbourg (carrelets). Le tableau de présentation des résultats mesurés en 2009 (Tableau V.29) illustre des traces de césium 137 présentes dans les deux espèces et des traces de plutonium 239+240 présentes dans les carrelets. L'activité en carbone 14 mesurée sur les échantillons de vieilles est plus importante que celle mesurée dans les carrelets. Comme pour l'année 2008, les activités des autres radionucléides d'origine artificielle recherchés sont restées inférieures aux limites de détection pour les deux lots de poissons analysés.

TOULON (83)
Eaux de mer

La surveillance des eaux de mer prélevées chaque trimestre dans la grande rade de Toulon n'a permis de détecter aucun émetteur gamma d'origine artificielle. Du tritium a été mesuré ponctuellement à un niveau proche de la limite de détection (Tableau V.30).

Sédiments

Des prélèvements trimestriels de sédiments marins sont effectués à la Tour Royale située dans la grande rade de Toulon. La radioactivité naturelle est principalement due au potassium 40 (Tableau V.31). Aucun radionucléide d'origine artificielle n'a été détecté au-dessus des limites de détection.

Faune et flore marines

Des prélèvements annuels de posidonies, de moules et de poissons sont effectués dans la grande rade de Toulon.

Dans ces trois types d'échantillon, la radioactivité mesurée est imputable au potassium 40 d'origine naturelle. Aucun des radionucléides d'origine artificielle recherchés n'a été mis en évidence dans les échantillons (Tableaux V.32 et V.33).

TABLEAU V.30 Activités moyennes mesurées dans des eaux de mer prélevées en 2009 dans la grande rade de Toulon (Bq/L).

| | Point de prélèvement | Radionucléide | Activité moyenne |
|-------------|----------------------|-------------------|------------------|
| Eaux de mer | Tour Royale | ¹³⁷ Cs | < 0,02 |
| | | ³ H | 5,6 ± 1,3 |
| | | ⁴⁰ K | 13,26 ± 0,54 |
| | | Bêta global | 12,18 ± 0,73 |

TABLEAU V.31 Activités moyennes mesurées dans des sédiments prélevés en 2009 dans la rade de Toulon (Bq/kg sec).

| | Radionucléide | Activité massique |
|-----------|---|-------------------|
| Sédiments | ⁴⁰ K | 469 ± 29 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,61 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,72 |
| | ¹⁰⁶ Ru | < 5,8 |
| | Autres émetteurs gamma (¹³⁴ Cs, ⁵⁸ Co) | < 0,9 |

TABLEAU V.32 Activités mesurées dans des algues (en Bq/kg frais) prélevées en 2009 dans la grande rade de Toulon.

| | Radionucléide | Posidonies |
|--------|---|---------------|
| Algues | ⁴⁰ K | 130 ± 15 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,23 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,27 |
| | ¹²⁹ I | 0,36 ± 0,16 |
| | Autres émetteurs gamma (¹³⁴ Cs, ⁵⁸ Co, ⁵⁴ Mn) | < 0,59 |
| | ⁹⁰ Sr | < 0,36 |
| | ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | 0,018 ± 0,003 |
| | ²⁴¹ Am | 0,015 ± 0,003 |

TABLEAU V.33 Activités mesurées dans des mollusques, crustacés et poissons prélevés en 2009 dans la grande rade de Toulon (Bq/kg frais).

| | Radionucléide | Moules | Poissons |
|---------------------------------|---|------------|----------|
| Mollusques, crustacés, poissons | ⁴⁰ K | 29,7 ± 5,0 | 112 ± 12 |
| | ⁶⁰ Co | < 0,22 | < 0,19 |
| | ¹³⁷ Cs | < 0,23 | < 0,19 |
| | ¹⁰⁶ Ru | < 2,1 | < 1,8 |
| | ⁹⁰ Sr | < 0,07 | < 0,05 |
| | Autres émetteurs gamma (¹³⁴ Cs, ⁵⁸ Co) | < 0,60 | < 0,19 |

RÉSEAU D'ÉTUDES TÉLÉHYDRO

Le suivi de la radioactivité dans certaines stations d'épuration de grandes agglomérations françaises

Depuis 2000 des dispositifs de télémesure afin de mieux quantifier l'impact hospitalier de médecine nucléaire dans les réseaux d'assainissement des eaux usées, sondes de spectrométrie gamma sont disposées dans les stations d'épuration de nuit permettant de mesurer directement et en continu la radioactivité des eaux usées. Elles peuvent détecter et quantifier simultanément la présence d'isotopes ^{131}I et de ^{137}Cs métastable, isotopes représentant 99% de la radioactivité utilisée par les services de médecine nucléaire.



La mesure est effectuée par spectrométrie gamma et les résultats sont récupérés à distance par l'IRSN et leur usage dans les applications est régi par le décret n° 2004-1182 du 10 novembre 2004. Les résultats sont publiés dans le bilan annuel de l'activité nucléaire en France. L'IRSN est le service français de l'Agence internationale pour la protection contre les rayonnements ionisants (AIEA) et de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS).



VI

LA SURVEILLANCE DES REJETS RADIOACTIFS DES SERVICES DE MÉDECINE NUCLÉAIRE

- VI.1 La médecine nucléaire, les radionucléides utilisés et leur mode d'élimination
- VI.2 La surveillance des rejets hospitaliers : le dispositif Téléhydro de l'IRSN



Montage de démonstration du fonctionnement d'une sonde du dispositif Téléhéro.

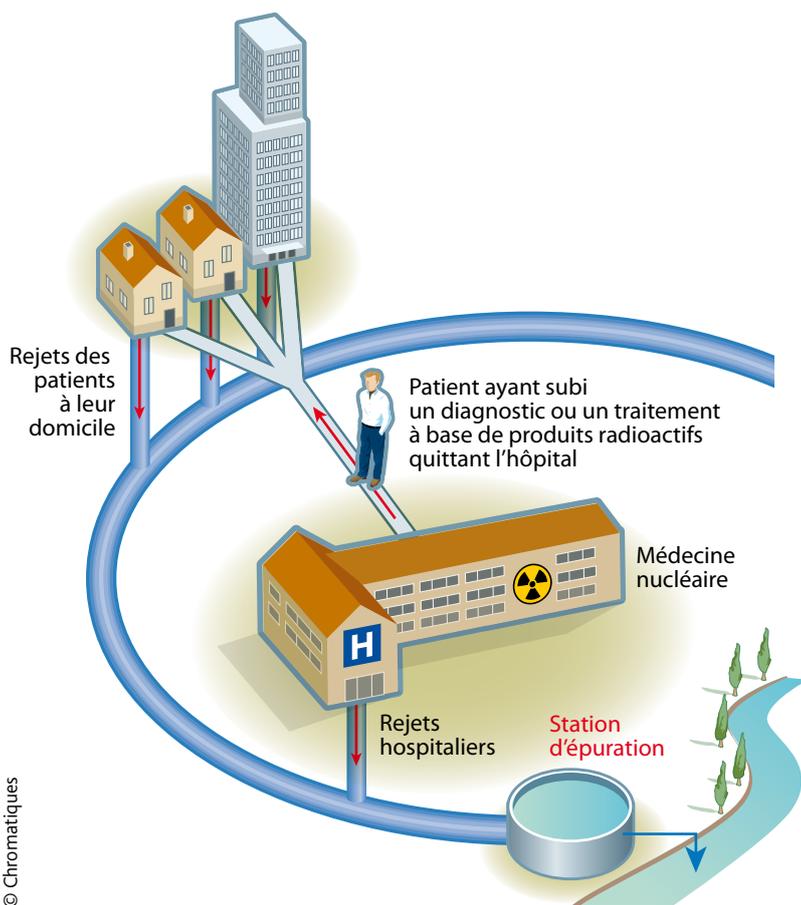
■ VI.1 LA MÉDECINE NUCLÉAIRE, LES RADIONUCLÉIDES UTILISÉS ET LEUR MODE D'ÉLIMINATION

La médecine nucléaire regroupe l'ensemble des applications médicales mettant en œuvre des substances radioactives à des fins de diagnostic ou thérapeutiques, qualifiées dans ce cas de « produits radiopharmaceutiques ». La vocation des services de médecine nucléaire est de déceler et de soigner des affections tumorales en utilisant les propriétés spécifiques de substances radioactives ou des rayonnements ionisants. Dans ces services, deux grandes pratiques mettent en œuvre des produits radiopharmaceutiques :

- **le diagnostic fonctionnel** : l'objectif est l'exploration fonctionnelle de certains organes par imagerie (le radionucléide majoritairement mis en œuvre est le technétium 99 métastable – l'iode 131 n'est plus utilisé) ;
- **la radiothérapie métabolique** : l'objectif est la destruction ciblée, par irradiation, de tissus pathologiques (l'iode 131 est le radionucléide le plus largement utilisé).

Ces deux radionucléides à courtes demi-vies (six heures pour le technétium 99 métastable et huit jours pour l'iode 131), fournissent à eux seuls près de 99 % de la radioactivité utilisée par les services de médecine nucléaire.

Les produits radiopharmaceutiques sont considérés comme des médicaments et sont soumis, de ce fait, aux mêmes contraintes administratives que tout autre médicament. Leur caractère radioactif les soumet, en plus, aux différentes réglementations relatives à la radioprotection des patients, des travailleurs exposés et du public. De la réception à l'élimination des produits radioactifs au sein des services de médecine nucléaire, en passant par la préparation ou encore l'administration des produits, des déchets et des effluents sont produits. Les déchets sous forme solide des services de médecine nucléaire, sont placés dans des conditionnements adaptés, conformes à la réglementation, puis sont traités dans des installations extérieures autorisées à cet effet.



© Chromatiques

FIGURE VI.1 Schéma du trajet des rejets d'effluents radioactifs dans les eaux usées urbaines.

Les effluents liquides (Figure VI.1) sont quant à eux normalement rejetés dans l'environnement de l'établissement hospitalier en respectant des règles de gestion imposées par la réglementation. Ces effluents sont de deux natures :

- ceux en provenance des lavabos ou des bondes d'évacuation : leur maîtrise est simple puisqu'ils peuvent être stockés et confinés par le réseau de canalisations de l'hôpital ;
- les urines et les selles des patients traités, qui peuvent présenter une activité significative durant quelques jours. 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. 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 et le plus souvent dans les végétaux aquatiques, à des concentrations comprises entre quelques Bq et quelques centaines de Bq par kilogramme de produit frais.

VI.2 LA SURVEILLANCE DES REJETS HOSPITALIERS : LE DISPOSITIF TÉLÉHYDRO DE L'IRSN

À partir de 2000, l'IRSN a réalisé des mesures radiologiques dans les eaux usées collectées par sept stations de traitement et d'épuration de grandes villes françaises. Des sondes de spectrométrie gamma ont été disposées dans les bassins de collecte des eaux usées et ont permis de mesurer la radioactivité d'origine artificielle de ces eaux pendant près de dix années, en particulier l'iode 131 et le technétium 99. Cette radioactivité provient des installations de recherche, industrielles et surtout hospitalières, installées en amont des réseaux d'assainissement.

Les mesures réalisées en continu par chaque station étaient récupérées et exploitées à distance par l'IRSN. L'information acquise à partir de ce dispositif a permis de préciser la compréhension des phénomènes de rejets de radioactivité artificielle dans les eaux usées.

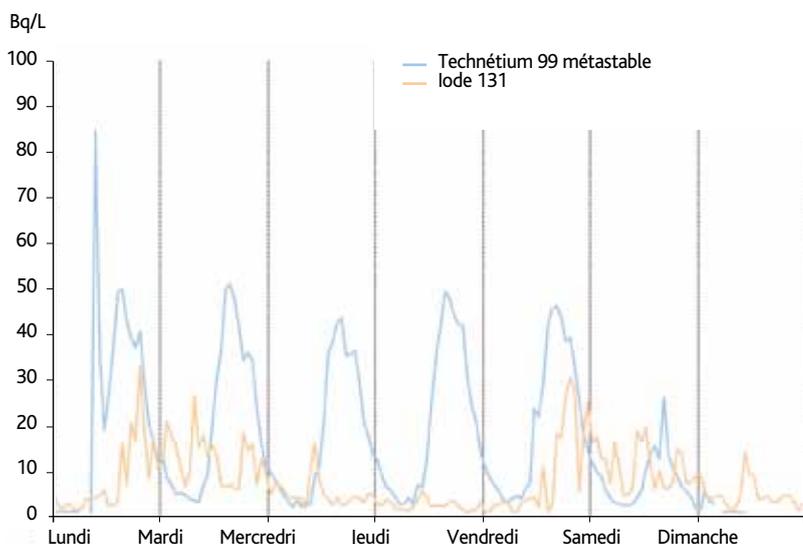


FIGURE VI.2 Moyennes horaires, mesurées sur une semaine, des activités de ^{131}I et de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ au sein de la station d'épuration de Rouen.

Les concentrations mesurées sur l'ensemble des stations varient de manière importante au cours d'une journée (Figure VI.2) :

- pour l'iode 131, de quelques Bq/L à plusieurs dizaines de Bq/L en moyenne, avec des maximums de l'ordre de 100 à 200 Bq/L ;
- pour le technétium 99 métastable, de quelques Bq/L à la centaine de Bq/L en moyenne, avec des maximums de l'ordre de plusieurs centaines de Bq/L, et dépassant ponctuellement le millier de Bq/L.

Au-delà des stations d'épuration, les concentrations des radionucléides rejetés dans l'environnement, c'est-à-dire dans les cours d'eau, sont inférieures aux limites de détections des balises Téléhydro, de l'ordre de 1 Bq/L. Par contre, l'iode 131 est parfois mesuré dans les MES et le plus souvent dans les végétaux aquatiques, à des concentrations comprises entre quelques Bq et quelques centaines de Bq par kilogramme de produit frais. Cette phase prospective terminée, les problèmes de maintenance devenant préoccupants, les dispositifs de mesure permanente ont été arrêtés début 2010.

En parallèle, le développement d'une nouvelle génération de balises Téléhydro, qui devrait aboutir en 2011, a été initié par l'IRSN afin d'assurer la poursuite de ce type de mesures dans le cadre d'études ponctuelles pour le compte d'agglomérations en exprimant le souhait.

En 2009, les tests engagés sur différents prototypes ont été réalisés dans des conditions contrôlées (Figure VI.3), permettant de prendre en compte des contraintes techniques spécifiques (résistance aux milieux agressifs, fiabilité, souplesse d'utilisation, compacité de l'équipement, etc.).



FIGURE VI.3 Photographie de trois prototypes Téléhydro immergés dans une cuve de test de 5 000 litres.

FOCUS

ÉTUDE DU TRANSFERT DE LA RADIOACTIVITÉ D'ORIGINE MÉDICALE DANS UN RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT : ESTIMATIONS DOSIMÉTRIQUES ASSOCIÉES

Entre 2002 et 2004, l'IRSN a mené une étude à Toulouse, à la demande de la Compagnie générale des eaux, exploitant de l'usine de dépollution de Ginestous. Le dispositif Téléhydro déployé à cette occasion comprenait une sonde fixe implantée dans l'usine de dépollution et une sonde mobile installée successivement en différents points du réseau d'assainissement de l'agglomération, en particulier à proximité des rejets des établissements de médecine nucléaire.

Les résultats de cette étude ont montré que l'iode 131, présent dans les eaux usées, et dans une moindre proportion en rivière, provient des selles des patients hospitalisés pour des thérapies anticancéreuses. En effet, pour une activité administrée à chaque injection de l'ordre de 3 700 mégabecquerels (MBq), environ 15 % sont éliminés par les selles. Chaque patient peut ainsi rejeter environ 550 MBq d'iode 131 au cours des cinq jours qui suivent l'administration du produit radio-pharmaceutique.

Les mesures réalisées au cours de vidanges successives des cuves de stockage des urines n'ont mis en évidence aucun marquage significatif d'iode 131 dans les eaux usées.

Cette étude a été complétée par des estimations de doses auxquelles des travailleurs (égoutiers ou agents de l'usine de dépollution) pourraient être exposés, par inhalation ou par irradiation externe. Les mesures de dose par irradiation externe ont été réalisées à partir de dosimètres d'ambiance, installés pendant plusieurs semaines en différents points de l'usine de dépollution et du réseau d'assainissement. La dose par inhalation a été estimée à l'aide de préleveurs d'air permettant la capture de l'iode 131 sur des cartouches de charbons actifs.

La dose efficace résultant du cumul de l'exposition externe et de l'exposition par inhalation est estimée de l'ordre de 0,1 mSv par an au maximum, soit dix fois inférieure à la limite réglementaire de dose pour les personnes du public qui est de 1 mSv par an. L'exposition externe contribue de façon prépondérante à la dose estimée, l'exposition par inhalation restant négligeable.



VII

LES EXPERTISES PONCTUELLES

VII.1 Dossier Orflam-Plast à Pargny-sur-Saulx (51)

VII.2 Dossier Isotopchim à Ganagobie

VII.3 Dossier site Charvet sur l'île Saint-Denis (93)



■ Prélèvement d'eau de surface dans l'étang de la Grévière à Pargny-sur-Saulx.

L'IRSN mène régulièrement, en appui aux services de l'État, des études particulières sur des sites sur lesquels des matières radioactives ont été utilisées ou stockées et où il persiste encore aujourd'hui un niveau de radioactivité supérieur au bruit de fond radiologique environnant. Ce sont généralement d'anciens sites industriels qui ont généré des résidus de procédés de fabrication ou d'anciens laboratoires de recherche. L'Institut intervient dans ce cadre pour rechercher les sources de contamination et évaluer les risques pour l'environnement et les personnes. Ces expertises font régulièrement l'objet de rapports adressés aux autorités. Ce chapitre restitue une synthèse de trois expertises conduites par l'Institut en 2009.

■ VII.1 DOSSIER ORFLAM-PLAST À PARGNY-SUR-SAULX (51)

La société Orflam-Plast implantée à Pargny-sur-Saulx dans la Marne (*Figure VII. 1*), a fabriqué, de 1932 à 1967, des pierres à briquet à partir du cérium extrait du minerai de monazite. Son procédé d'extraction chimique a entraîné une production importante de résidus solides à base de sel de thorium, qui ont été utilisés comme remblais et disséminés autour de l'usine.

L'ANDRA a sollicité l'aide de l'IRSN pour réaliser des investigations radiologiques dans l'environnement de l'usine afin d'évaluer l'étendue des zones contaminées et pouvoir ainsi les sécuriser au besoin.



FIGURE VII.1 Bâtiment principal de l'ancienne usine Orflam-Plast à Pargny-sur-Saulx.

Des cartographies radiologiques de surface ont été réalisées avec le dispositif Socrate (relevé de cartographie du débit de dose) sur la zone de la peupleraie et sur les berges de l'étang de la Grévière (Figures VII.2 et VII.3). Le débit d'équivalent de dose moyen mesuré à 50 cm du sol sur la peupleraie est de 1 $\mu\text{Sv/h}$, soit 10 à 15 fois la valeur habituelle dans l'environnement hors influence de ce site. Les valeurs maximales obtenues sur trois points sont de l'ordre de la vingtaine de $\mu\text{Sv/h}$. Pour ce qui concerne l'étang de la Grévière, deux zones marquées présentent un débit d'équivalent de dose moyen de quelques $\mu\text{Sv/h}$. La valeur maximale mesurée est de l'ordre d'une vingtaine de $\mu\text{Sv/h}$.

Soixante échantillons de terre ont été prélevés entre 25 et 50 cm de profondeur sur ces deux zones, puis caractérisés *in situ* dans un des véhicules laboratoires de l'IRSN. Leur niveau d'activité massique en ^{228}Ac , pris comme indicateur du marquage par le ^{232}Th , est compris entre quelques dizaines de Bq/kg et quelques dizaines de MBq/kg (soit 15 000 fois la valeur naturelle du sol de la région).

Concernant le milieu aquatique, 18 échantillons ont été prélevés (eaux, sédiments, végétaux aquatiques)

en 12 points répartis autour de l'étang de la Grévière et de l'ancienne usine (Figure VII.4). Des poissons ont également été pêchés dans l'étang de la Grévière et dans la Saulx en amont et en aval de l'usine. Les résultats de ces analyses indiquent un marquage en radionucléides de la chaîne du thorium et de l'uranium dans deux sédiments provenant de l'étang, jusqu'à des niveaux 50 fois plus importants que l'activité mesurée aux autres points (entre 10 et 80 Bq/kg sec de ^{232}Th) de l'étang et de la Saulx. Les eaux de l'étang de la Grévière ne sont en revanche pas marquées par ces radionucléides, principalement à cause de la faible solubilité du thorium dans l'eau. Les niveaux d'activité mesurés dans les végétaux ne se distinguent pas des niveaux moyens observés dans des végétaux aquatiques prélevés sur le territoire français. Enfin, les poissons prélevés ne présentent pas de marquage significatif provenant de la contamination des sédiments de l'étang dans lequel ils évoluent.

Les résultats de cette expertise et les recommandations émises par l'IRSN ont été intégrés par l'ANDRA dans la mise en sécurité des zones contaminées en dehors du site et la déconstruction de l'usine. Ces travaux, réalisés en relation avec la Commission nationale des aides dans le domaine radioactif (CNAR), devraient s'achever courant 2011.



FIGURE VII.2 Dispositif Socrate de cartographie du débit de dose.

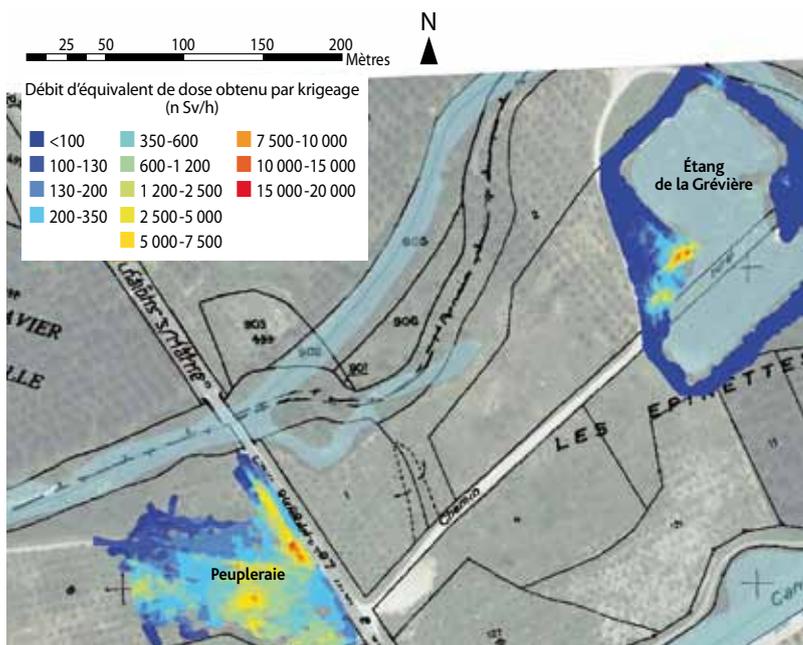
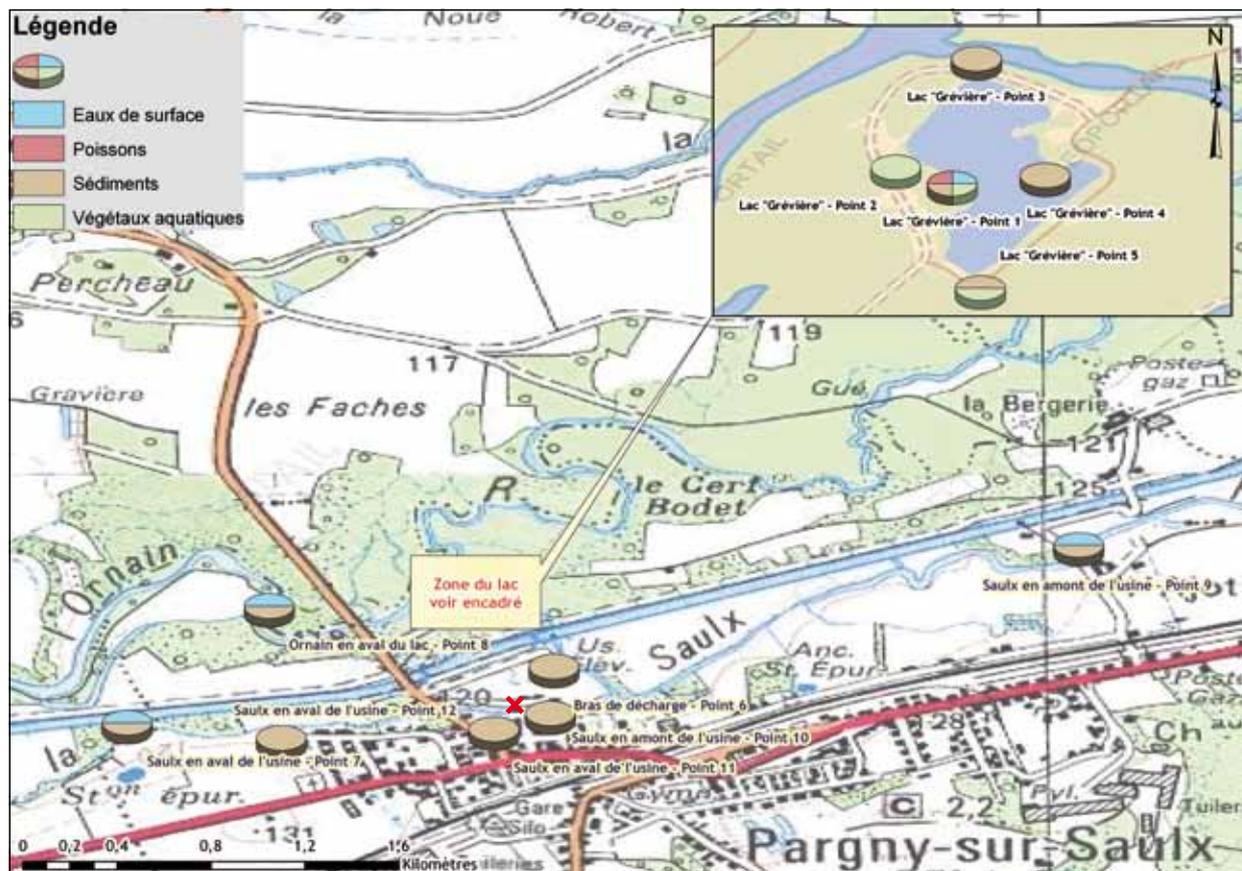


FIGURE VII.3 Cartographie du débit de dose mesuré à proximité de l'étang de la Grévière et dans la peupleraie.



✗ Situation de l'usine

FIGURE VII.4 Carte de situation des prélèvements réalisés en avril 2009.

VII.2 DOSSIER ISOTOPCHIM À GANAGOBIE (04)

L'environnement proche de l'ancien laboratoire de la société Isotopchim, situé au lieu-dit « le Belvédère de Ganagobie », à une trentaine de kilomètres au nord-ouest de Forcalquier (04), est contaminé en carbone 14. Cette contamination est la conséquence des rejets atmosphériques, de 1989 à 1997, de ce laboratoire, dédié notamment à la production de molécules marquées pour la chimie fine. La Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la CNAR ont demandé à l'IRSN d'examiner la question du devenir des arbres situés dans le « Parc », à proximité et sous les vents dominants de l'ancien local d'Isotopchim.

En 2001, l'activité spécifique du ^{14}C d'échantillons de bois du Parc variait de 9 500 à 25 000 Bq/kg de carbone (Bq/kg C) et celle de la matière organique des sols de 6 000 à 66 000 Bq/kg C. Aujourd'hui, alors que les feuilles et les jeunes branches ont vu leur activité décroître très fortement, l'activité spécifique observée en 2001 perdue dans le bois formé durant la phase d'exploitation du laboratoire et diminue très lentement dans les sols. Le stock actuel de carbone 14 contenu dans le bois des arbres du Parc a été estimé à environ 400 MBq (260 à 600 MBq).

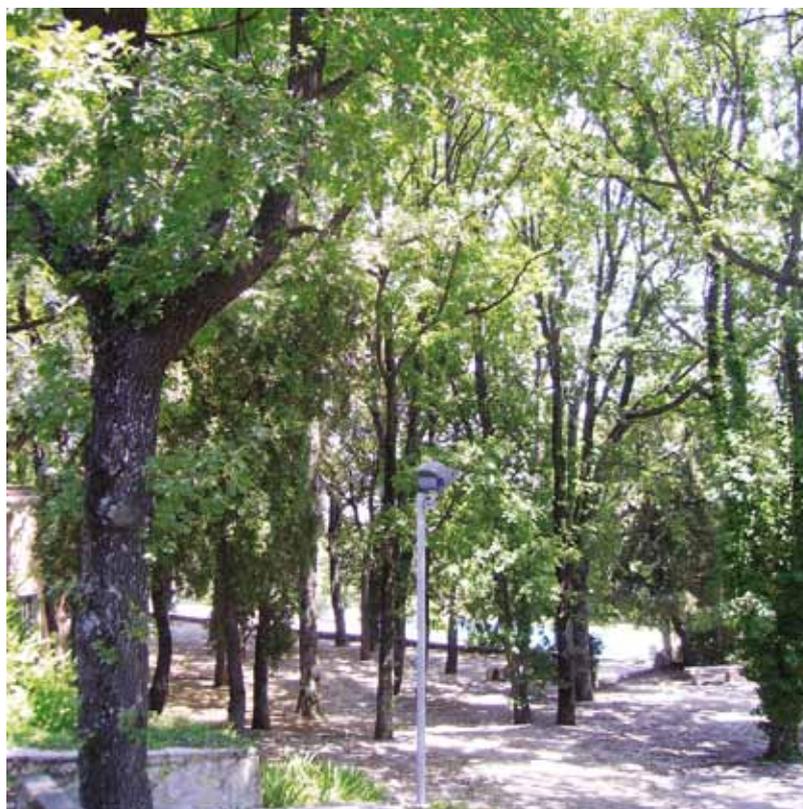


FIGURE VII.5 Vue sur le « Parc » situé sous les vents dominants de l'ancien local d'Isotopchim.

L'IRSN a procédé à l'évaluation des conséquences radiologiques qui résulteraient des situations susceptibles de survenir selon les deux options de gestion envisagées :

- le maintien du site en l'état, en particulier en laissant sur place les arbres et en continuant l'entretien du site qui est fait actuellement ;
- l'enlèvement total ou partiel de ces arbres.

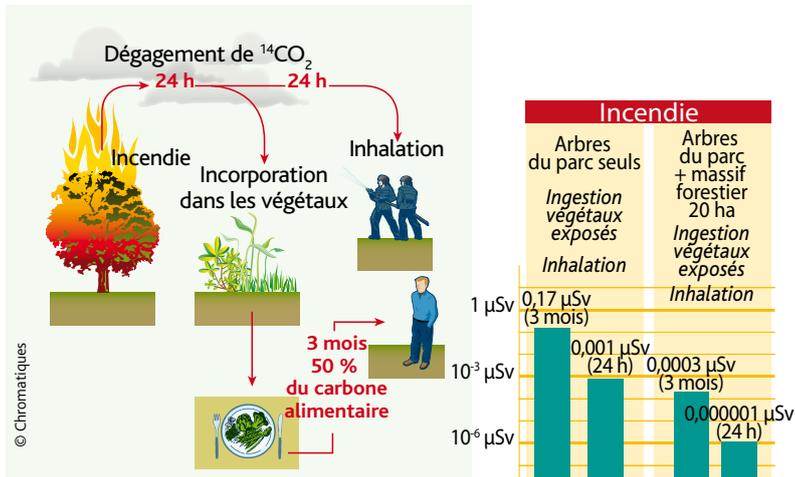


FIGURE VII.6 Schéma résumant le scénario étudié et les conséquences dosimétriques (dose efficace à l'adulte) dans le cas d'un incendie.

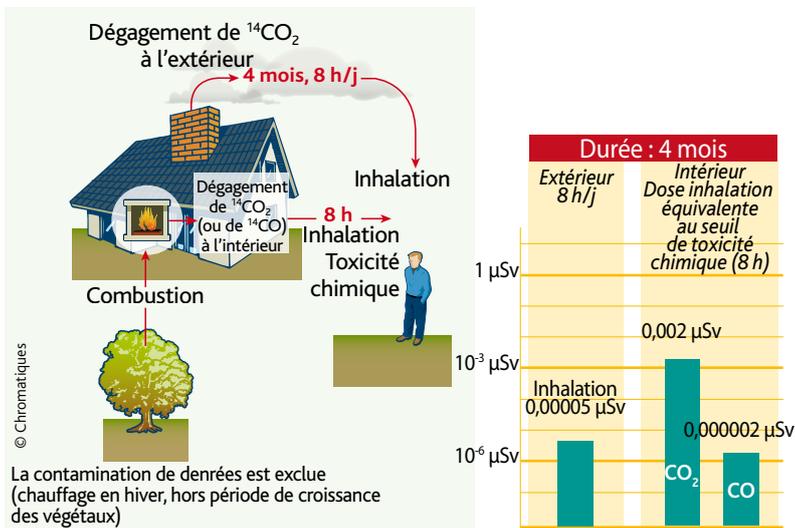


FIGURE VII.7 Schéma résumant le scénario étudié et les conséquences dosimétriques (dose efficace à l'adulte) dans le cas d'un chauffage au bois en cheminée.

Différents scénarios susceptibles d'induire une exposition des individus ont été examinés en particulier :

- un incendie des arbres (Figure VII.6) induisant d'une part une augmentation de l'activité en ^{14}C de végétaux consommés localement et, d'autre part, l'exposition d'une personne qui respirerait l'air contaminé en ^{14}C par le panache de l'incendie ;
- l'inhalation par une personne (Figure VII.7) d'un air contaminé par le brûlage en cheminée de bois des arbres ;
- l'inhalation d'air dont la teneur en ^{14}C serait renforcée du fait soit de l'émanation à partir du sol (rémanence de matières organiques et racines ayant été contaminées durant la phase de rejets d'Isotopchim), soit de l'utilisation de compost issu de l'entretien des espaces verts du site ;
- l'ingestion par inadvertance de sol contaminé (dans le cas d'enfants jouant à cet endroit).

Les calculs d'impact ont été réalisés en adoptant des hypothèses volontairement pénalisantes. Les résultats montrent qu'aucune des conjectures examinées n'aboutit à un risque dosimétrique significatif, les doses variant du pico-sievert à quelques centaines de nano-sieverts, à comparer à la dose liée au ^{14}C naturel, de l'ordre de 12 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Ces très faibles valeurs font que les incertitudes inhérentes aux calculs et aux hypothèses prises en compte n'ont pas d'incidence sur le sens des conclusions. Les conséquences de l'une ou l'autre des options envisagées, maintien en l'état du site ou enlèvement des arbres, se traduisent par des niveaux de dose négligeables par rapport à la dose imputable au bruit de fond naturel. L'élimination des arbres n'apporterait qu'un « bénéfice » très relatif en termes de diminution de la contamination du site, étant donné que le sol et les systèmes racinaires en place resteraient contaminés.

Il ressort de cette étude qu'il n'y a pas de risque dosimétrique significatif lié au maintien des arbres contaminés en ^{14}C sur le site et donc aucune justification technique à les supprimer.

Pour en savoir plus : rapport DEI/SESURE 2009-40 disponible sur le site de l'IRSN

VII.3 DOSSIER SITE CHARVET SUR L'ÎLE SAINT-DENIS (93)

Au début du siècle dernier, le radium était ensuite utilisé pour ses propriétés luminescentes dans l'industrie (peinture luminescentes) et en médecine (radiothérapie). De 1913 à 1928, la société SATCHI a exercé, comme deux autres usines, une activité industrielle d'extraction du radium à partir de minerais d'uranium sur son site de l'île Saint-Denis. Cette activité a laissé des traces de contamination, révélées en 1997-1998, lors de la destruction des bâtiments de l'établissement Charvet SA, dernier propriétaire en date du site, en prévision d'un projet d'écoquartier.

En 2009, l'IRSN a réalisé un diagnostic radiologique sur ce site afin d'évaluer l'étendue de la pollution, à la demande de l'entreprise Charvet SA et sur commande du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer. Cette étude a porté sur la mesure de contamination de surface (débit de dose) ainsi que sur l'analyse radiologique de la terre et des eaux souterraines.

La cartographie du débit d'équivalent de dose en surface (à 50 cm du sol) a été réalisée à l'aide de l'outil de cartographie Socrate de l'IRSN (Figure VII.8). Les variations enregistrées sont très hétérogènes. Afin d'analyser l'étendue de la contamination en profondeur, 190 échantillons des sols ont été réalisés à partir de 74 sondages répartis uniformément sur le site.

Leur analyse confirme la présence d'une pollution par radium jusqu'à quelques mètres de profondeur, atteignant des concentrations de l'ordre de quelques Bq/g à 100 Bq/g. À titre comparatif, la concentration en radium d'origine naturelle dans les sols de l'île Saint-Denis est d'environ 0,01 Bq/g.

Enfin, les analyses des eaux de la nappe aquifère prélevées dans des piézomètres implantés à proximité du site Charvet, montrent une contamination en isotopes 234 et 238 de l'uranium pour les prélèvements situés en aval et à proximité immédiate de ce site. Les concentrations mesurées, de l'ordre de 2 Bq/L, sont quelques dizaines de fois supérieures à celles des eaux hors influence du site.

Ce constat radiologique a permis de montrer que l'essentiel de la radiocontamination est limitée à l'enceinte de l'entreprise Charvet SA et s'observe ponctuellement aux alentours. Bien que la pollution ne présente pas de risque sanitaire pour les populations, des travaux de dépollution du site ont débuté en 2010, sous l'égide de l'ANDRA, en vue du projet de réhabilitation du site. L'IRSN a préconisé le contrôle radiologique des matériaux issus de la déconstruction, une étude hydrogéologique et la mise en place d'un programme de surveillance à long terme.

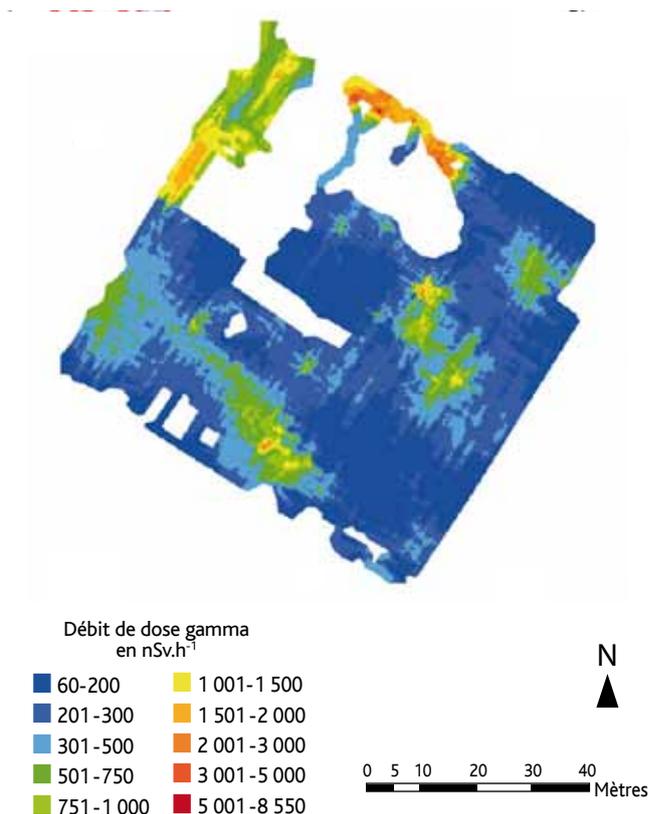


FIGURE VII.8 Cartographie radiologique de surface (à 50 cm du sol) du site Charvet.



FIGURE VII.9 Forage de prospection sur le site Charvet.



VIII

EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS DE LA POPULATION EN FRANCE

VIII.1 Exposition moyenne de la population en France

VIII.2 Comment passer des Becquerels (Bq) de radionucléides d'origine artificielle au Sievert (Sv) ?

VIII.3 Calculs de doses par ingestion correspondant aux activités artificielles environnementales mesurées



VIII.1 EXPOSITION MOYENNE DE LA POPULATION EN FRANCE

L'ensemble des sources de radioactivité d'origine naturelle ou artificielle, contribue à l'exposition des individus. Cette exposition de la population française fait l'objet d'évaluations par l'IRSN (Figure VIII.1).

Un français reçoit au total une dose annuelle moyenne de l'ordre de 3,7 mSv. Cette valeur, qui dépend de l'emplacement géographique et du mode de vie, est à considérer comme un indicateur macroscopique et n'est pas applicable à un groupe de personnes en particulier.

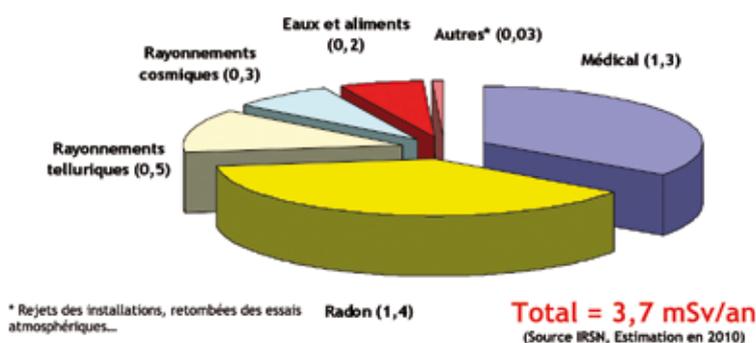


FIGURE VIII.1 L'exposition aux rayonnements ionisants de la population en France.

EXPOSITION PAR LA RADIOACTIVITÉ D'ORIGINE NATURELLE

L'exposition de la population française par la radioactivité naturelle a plusieurs origines :

- **le radon**, gaz descendant de l'uranium, peut s'accumuler dans les habitations et représente une contribution importante à la dose moyenne, de l'ordre de 1,4 mSv par an et par personne, avec une variabilité d'un facteur 15 entre les départements les plus exposés et les moins exposés ;
- **les radionucléides naturels** présents dans le sol induisent un rayonnement tellurique responsable d'une exposition externe (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K ...) de l'ordre de 0,5 mSv par an et par personne en moyenne. La variabilité de cette exposition en France est de l'ordre d'un facteur 5 ;
- **le rayonnement cosmique** induit une exposition externe qui varie en fonction de l'altitude. Elle est en moyenne de 0,28 mSv par an et par personne. Au niveau de la mer, elle est de l'ordre de 0,27 mSv par personne et par an et passe à 0,38 mSv pour les départements qui présentent l'altitude moyenne la plus élevée ;
- **l'exposition par ingestion de radionucléides naturels** présents dans les aliments et l'eau compte pour 0,23 mSv par an et par personne, dont 0,18 mSv attribuable au seul potassium 40. Cette exposition dépend des régimes alimentaires et des types de sols.

Le coefficient de dose est la dose reçue par l'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 (inhalation, ingestion, exposition externe à un panache ou à un dépôt ou par immersion dans l'eau). Il est calculé grâce à des modèles décrivant le cheminement des radionucléides dans les différentes parties de l'organisme et à l'utilisation de modèles dosimétriques.

VIII.3 CALCULS DE DOSES PAR INGESTION CORRESPONDANT AUX ACTIVITÉS ARTIFICIELLES ENVIRONNEMENTALES MESURÉES

Pour la plupart des radionucléides d'origine artificielle rejetés par les installations nucléaires, leur concentration est trop faible pour être détectable dans les différents compartiments de l'environnement. Néanmoins, quelques-uns restent aujourd'hui encore mesurables. Le Tableau VIII.1 indique les activités maximales, toutes régions et tous sites confondus, enregistrées pour quatre radionucléides produits artificiellement : ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ dans plusieurs denrées (salade, lait, viande, mollusque et poisson).

TABLEAU VIII.1 Activités maximales (Bq/kg frais ou Bq/L pour le lait) mesurées en 2009 par l'IRSN dans plusieurs denrées analysées dans le cadre de la surveillance radiologique.

| | ^3H | ^{90}Sr | ^{137}Cs | $^{239+240}\text{Pu}$ |
|-------------------|--------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| Salade | 0,032 | 0,068 | 0,079 | - |
| Lait | 31 | 0,21 | 0,49 | - |
| Viande - muscle | 0,14 | - | 1,9 | - |
| Mollusque - chair | - | - | 0,026 | 0,0057 |
| Poisson - chair | - | - | 0,41 | 0,022 |

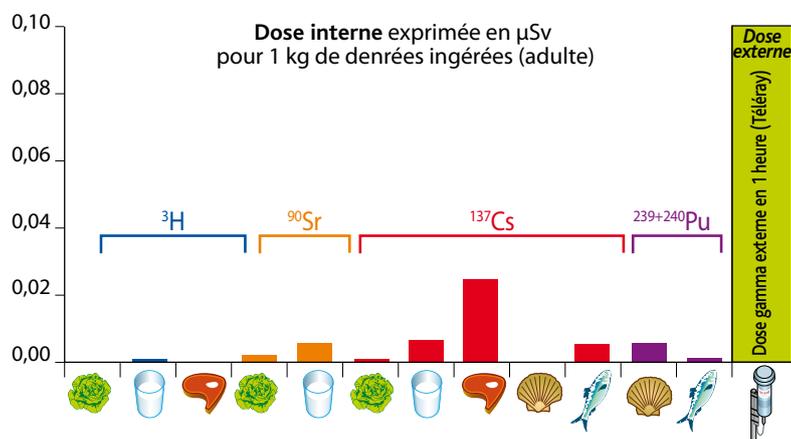


FIGURE VIII.3 Dose efficace (μSv) calculée pour 1 kg de denrées ingérées par un adulte, à partir de valeurs maximales mesurées en 2009 par l'IRSN dans quelques denrées – comparaison à la dose externe par le rayonnement cosmique et tellurique en 1 heure (μSv).

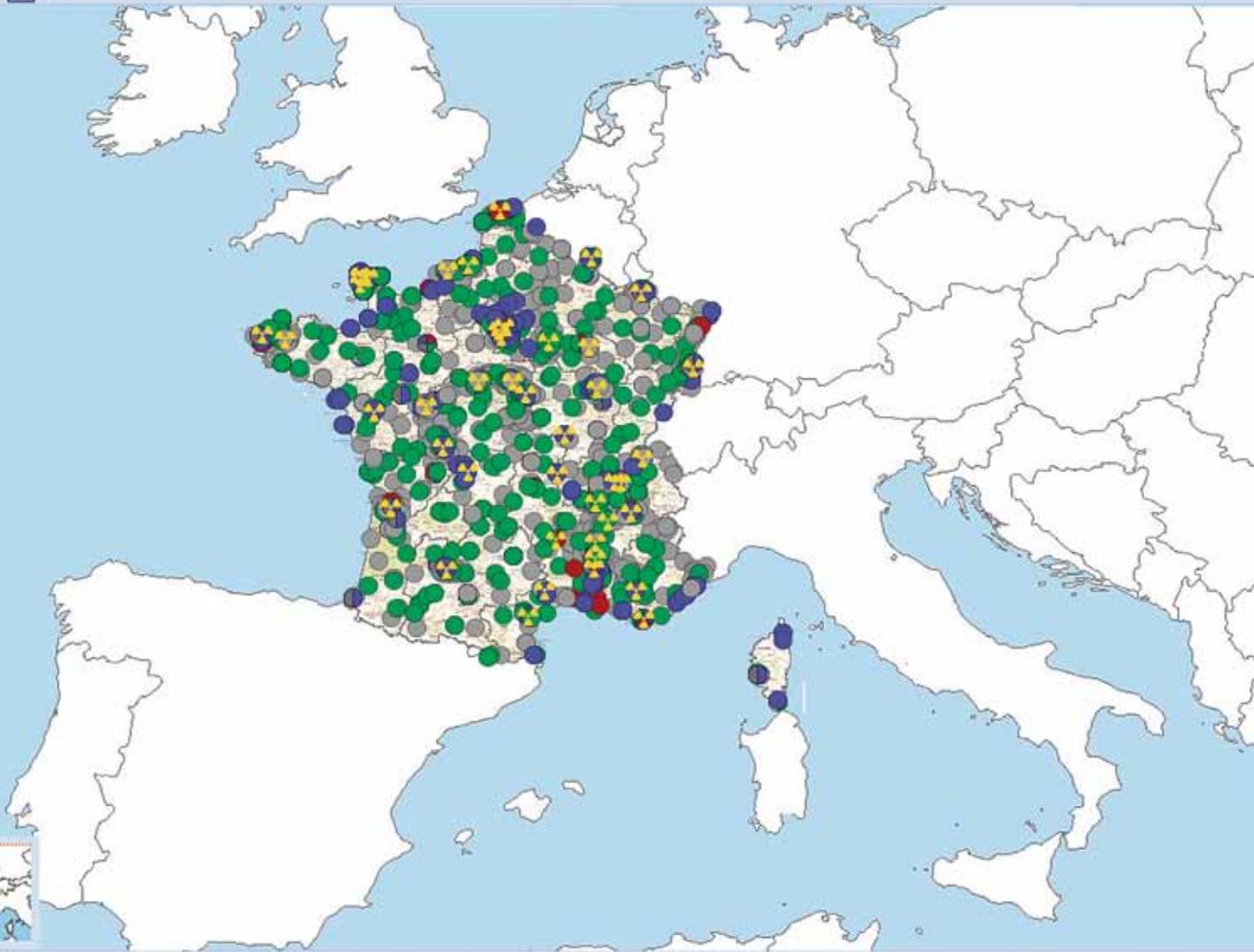
Sur la base de ces mesures et de l'hypothèse de 1 kg ingéré de chaque denrée, des calculs ont été réalisés pour un adulte. Ils sont présentés par radionucléide dans la Figure VIII.3. Pour situer les ordres de grandeur, ils sont comparés à la dose externe reçue en une heure en moyenne en France par le rayonnement gamma tellurique et cosmique (enregistrement Téléray) : 90 nSv/h (0,00009 mSv/h).

Les doses efficaces par ingestion unitaire ainsi calculées sont très faibles, toujours inférieures à 1 $\mu\text{Sv}/\text{kg}$ (0,001 mSv/kg) et essentiellement entre 0,000001 $\mu\text{Sv}/\text{kg}$ et 0,03 $\mu\text{Sv}/\text{kg}$ par radionucléide. Bien que les activités massiques de plutonium soient faibles, on note que la contribution de ce radionucléide aux doses par ingestion n'est pas négligeable comparée aux autres. À l'inverse, malgré des activités plus élevées, le tritium ne contribue que très peu à la dose par ingestion.

Un calcul d'impact ne peut être effectué à partir de ces données puisqu'elles concernent plusieurs régions, plusieurs sites et qu'elles ne couvrent que les activités maximales supérieures à la limite de détection mesurées pour un nombre limité de radionucléides. Néanmoins, une estimation grossière réalisée sur la base de ces activités maximales enregistrées en 2009, et en considérant une consommation de denrée de 500 kg/an, conduit à une dose annuelle indicative comprise entre 1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ et 13 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, cohérente avec les estimations par simulation mathématique.

Si l'on considère la contribution de l'ensemble des radionucléides artificiels mesurés en 2009 au-dessus de la limite de détection, tous sites confondus, on peut estimer que pour atteindre une dose de 1 mSv correspondant à la valeur limite réglementaire admissible pour la population (hors exposition médicale et naturelle), il faudrait ingérer :

- 40 000 kg de viande ;
- ou 300 000 kg de salade ;
- ou 100 000 litres de lait
- (20 000 pour un enfant de 0 à 1 an) ;
- ou 40 000 kg de chair de mollusque ;
- ou 50 000 kg de chair de poisson.



Accès Outre-Mer et retour France métropolitaine



IX

DIFFUSION DES DONNÉES DE L'IRSN

- IX.1 Le site Internet thématique « environnement » de l'IRSN
- IX.2 Le site Internet cartographique du RNM
- IX.3 La diffusion d'information dans le cadre de traités ou conventions internationaux



Depuis plusieurs années, l'IRSN poursuit une démarche visant à mieux faire connaître les conclusions de ses expertises sur la radioactivité de l'environnement et les résultats de la surveillance du territoire, notamment en mettant à disposition des informations variées sur son site Internet.

Cela se traduit par une communication sur plusieurs axes, depuis les informations événementielles qui font l'objet d'une actualité spécifique en première page du site institutionnel www.irsn.fr, jusqu'au site dédié à l'environnement par lequel l'IRSN met à disposition l'ensemble des résultats acquis dans le cadre de sa mission de surveillance radiologique de l'environnement.

En tant qu'acteur majeur de la surveillance radiologique, l'IRSN alimente également le site Internet du Réseau national de mesure de la radioactivité dans l'environnement (RNM), ouvert depuis le 1^{er} janvier 2010.

■ IX.1 LE SITE INTERNET THÉMATIQUE « ENVIRONNEMENT » DE L'IRSN

En mars 2009, l'Institut a mis en ligne un portail consacré à la radioactivité dans l'environnement, (<http://environnement.irsn.fr>) qui donne accès aux résultats de mesures de la radioactivité dans l'environnement acquis par l'IRSN et à une base documentaire.

UNE CARTE INTERACTIVE

Une carte interactive permet d'accéder facilement aux résultats de la surveillance réalisée par l'IRSN, obtenus dans les différents milieux (atmosphérique, aquatique, biologique et minéral) en un lieu donné, aussi bien autour des sites nucléaires que sur le reste du territoire. Chaque jour, la moyenne des valeurs obtenues la veille sur chacune des stations du réseau d'alerte Téléry est mise en ligne. Pour les autres réseaux, la mise à jour est mensuelle.

À ce jour, plus d'un million de données sont disponibles.

Un effort a été entrepris pour permettre l'accès à des données plus anciennes et ainsi placer l'évolution de la radioactivité de l'environnement dans une perspective historique, avec des représentations graphiques facilitant la visualisation des tendances. L'historique des données accessibles sur ce site dépend de la date de mise en service des équipements ou des stations de collecte d'échantillons. Pour certaines stations de collecte des aérosols sur filtre, les données peuvent remonter à plus de quarante ans (filtres aérosols notamment).

- Un site dédié à l'environnement (unique en Europe)
- Plus d'un million de données disponibles
- Communication française et à l'international

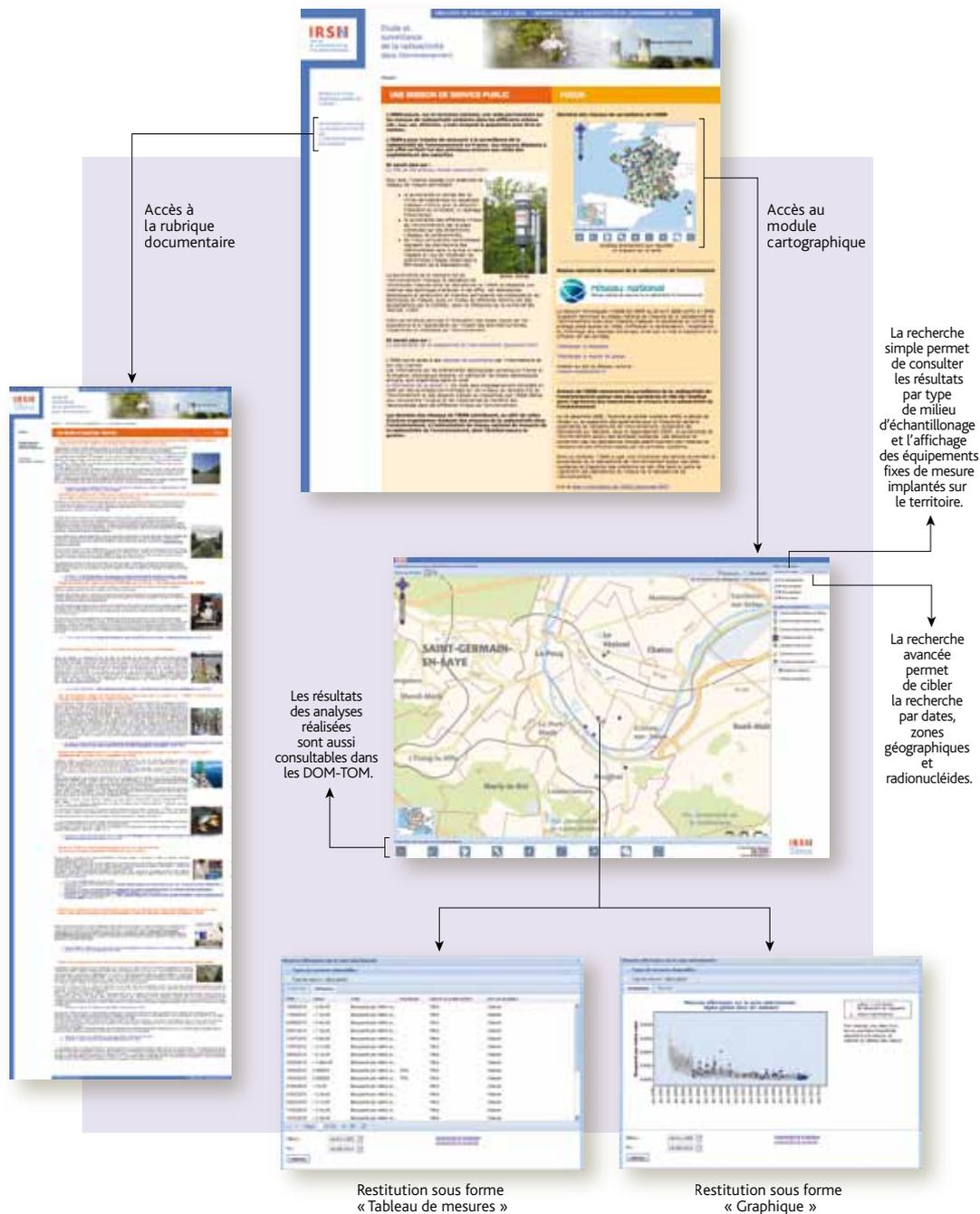


FIGURE IX.1 Le portail de l'environnement de l'IRSN : documentation et cartographie interactive.

UNE RUBRIQUE DOCUMENTAIRE

Le site présente également une branche documentaire sur la radioactivité de l'environnement en France, donnant accès aussi bien à des fiches synthétiques qu'à des rapports de l'IRSN, offrant des niveaux de lecture différents en fonction des objectifs des internautes.

Outre l'accès aux bilans annuels de la surveillance de la radioactivité de l'environnement en France métropolitaine et en Polynésie française, des thématiques sont présentées dans cette rubrique :

- les retombées atmosphériques de substances radio-actives ayant affecté le territoire dans le passé (essais atmosphériques d'armes nucléaires, accident de Tchernobyl) ;

- les études et expertises menées par l'IRSN sur l'état radiologique de l'environnement ; comme récemment les conclusions de l'expertise du site de Ganagobie pollué au ^{14}C ; les études d'impact sur l'environnement suite au passage du nuage de cendres du volcan Eyjafjöll sur la France et consécutives aux feux de forêt en Russie.

Cette rubrique documentaire s'étoffe progressivement au fil du temps, grâce à d'autres travaux de synthèse et d'expertise menés par l'IRSN sur l'état radiologique de l'environnement et son évolution.

IX.2 LE SITE INTERNET CARTOGRAPHIQUE DU RNM

Le site Internet du Réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement (RNM) rassemble les résultats de mesures produits par l'IRSN et les laboratoires agréés depuis janvier 2009 :

- dans le cadre de dispositions législatives ou réglementaires visant à évaluer les doses auxquelles la population est soumise, notamment celles résultant des activités nucléaires ;
- à la demande des collectivités territoriales, des services de l'État et de ses établissements publics ;
- par tout organisme public, privé ou associatif, et dont l'organisme détenteur des résultats demande leur diffusion sur le réseau national.

www.mesure-radioactivite.fr

Le site de référence de mesures de la radioactivité de l'environnement.



Ce site, dont l'Institut assure la gestion, offre aux internautes des solutions de navigation adaptées à chacun, selon ses habitudes de recherche et ses besoins (recherche géographique, recherche par thème, recherche avancée).

Il est conçu pour permettre un accès facile et rapide à toutes les informations relatives au RNM (réglementation, fonctionnement, agrément des laboratoires) et propose une rubrique pédagogique ayant pour ambition d'expliquer le phénomène de la radioactivité, sa mesure, ses effets biologiques, etc. Un soin particulier a été apporté pour donner à l'internaute les clés pour comprendre les résultats des mesures présentés dans le site. Ce site Internet permet enfin à l'internaute d'accéder directement, dès la page d'accueil, aux différents sites Internet des acteurs du réseau national et des principaux producteurs de mesures en France.

En moyenne, 15 000 nouveaux résultats de mesures sont ajoutés chaque mois sur le site Internet du réseau national. Le réseau national permet ainsi de disposer d'une vision la plus globale possible de l'ensemble des mesures de radioactivité réalisées dans l'environnement par les différents acteurs impliqués.

IX.3 LA DIFFUSION D'INFORMATION DANS LE CADRE DE TRAITÉS OU CONVENTIONS INTERNATIONAUX

L'action de l'IRSN en matière d'information sur la surveillance de la radioactivité de l'environnement peut s'opérer aussi dans le cadre international.

LA DIFFUSION DES DONNÉES DANS LE CADRE DU TRAITÉ EURATOM

Chaque année, l'IRSN transmet à la Commission européenne, au nom de l'État français, des résultats de mesures de la radioactivité de l'environnement portant sur les particules aérosols, l'eau, le lait et la ration alimentaire, pour satisfaire aux exigences des articles 35 et 36 du traité Euratom. Cet envoi est complété par un déversement automatique toutes les douze heures des données brutes des sondes du réseau Téléray. La Commission européenne édite régulièrement un rapport de synthèse au niveau européen issu de l'exploitation des données transmises par les états membres. Un portail Internet public (<http://rem.jrc.ec.eu.int>) permet de se connecter aux différentes bases de données de la Commission européenne pour en visualiser les résultats.

LES DONNÉES TRANSMISES À LA COMMISSION OSPAR

Depuis une quinzaine d'années, l'IRSN est impliqué dans les travaux de la Commission pour la protection du milieu marin de l'Atlantique Nord-Est, dite Commission OSPAR. L'Institut a fourni notamment des données de radioactivité relatives aux prélèvements marins réalisés sur la façade Atlantique – Manche (eau, sédiments, faune et flore) qui ont été utilisées pour la mise en place d'une « ligne de base », point de référence permettant d'apprécier régulièrement les progrès accomplis depuis 1998 dans la diminution du marquage environnemental imputable aux activités humaines. Ces transmissions de données sont amenées à se poursuivre.

ou leur interaction avec ceux-ci qui génère des rayonnements gamma et/ou diverses particules. Les neutrons sont aussi présents aux altitudes de vol des avions long courrier et subsoniques, ils participent à 30 % de la dose reçue par le personnel navigant. Les rayonnements neutroniques ont une énergie variable, il faut parfois recourir à des matériaux légers contenant notamment des atomes d'hydrogène pour les arrêter.

LA MESURE DE LA RADIOACTIVITÉ

Pourquoi la radioactivité diminue-t-elle ?

Les rayonnements issus de la radioactivité ne sont pas directement perceptibles. La radioactivité est invisible, inaudible, inodore... Elle n'a donc pu être mise en évidence que lorsque l'homme eut à sa disposition des outils permettant d'observer le phénomène, puis de déterminer sa nature et de mesurer son intensité avec précision grâce à divers appareils.

La radioactivité diminue avec le temps. Mais un temps plus ou moins long selon les atomes et qui dépasse parfois celui d'une existence humaine. À mesure qu'un atome se désintègre, sa radioactivité disparaît lorsqu'il se transforme en atome stable, donc non radioactif.

Deux chercheurs (Rutherford et Soddy) ont établi qu'une substance radioactive perd la moitié de sa radioactivité, c'est-à-dire que la moitié des atomes de la substance se sont désintégrés, sur une durée de temps qui lui est propre. Cette durée est appelée « période radioactive ». Elle varie d'un atome à l'autre.

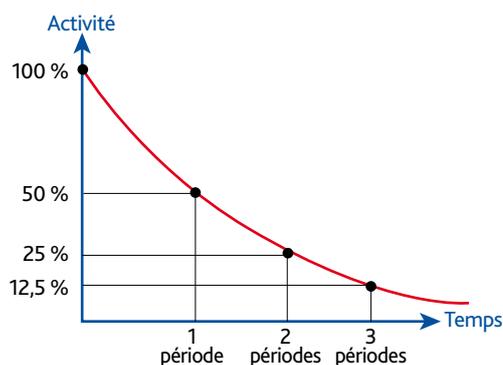


FIGURE X.1 Représentation graphique de la décroissance radioactive.

TABLEAU X.1 Exemples de périodes radioactives

| Éléments chimiques | Période radioactive |
|--------------------|-------------------------|
| Uranium 238 | 4,47 milliards d'années |
| Potassium 40 | 1,3 milliards d'années |
| Uranium 235 | 704 millions d'années |
| Carbone 14 | 5 730 ans |
| Radium 226 | 1 600 ans |
| Césium 137 | 30,2 ans |
| Strontium 90 | 28,8 ans |
| Tritium | 12,3 ans |
| Cobalt 60 | 5,27 ans |
| Iode 131 | 8,05 jours |
| Phosphore 30 | 2,55 minutes |
| Hélium 6 | 0,82 seconde |

Comprendre les unités de mesure de la radioactivité

Le Becquerel (Bq)

La radioactivité d'un échantillon se caractérise par le nombre de désintégrations de noyaux radioactifs par seconde qui s'y produisent. L'unité de mesure de la radioactivité est le Becquerel (Bq).

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration par seconde}$$

L'activité de sources s'exprime le plus souvent en multiples du Becquerel (kBq, MBq, GBq, TBq), tandis que l'activité d'échantillons environnementaux s'exprime en Bq, mBq ou μBq .

L'activité est souvent rapportée à un volume (activité volumique en Bq/L ou Bq/m³), une masse (activité massique en Bq/kg) ou une surface (activité surfacique en Bq/m²). L'ancienne unité de mesure de la radioactivité est le Curie (Ci), défini comme l'activité de 1 gramme de radium, soit 1 Ci = 37 milliards de Bq.

Cette mesure rend compte du nombre de désintégrations, mais pas de leur énergie, ni de leur effet sur l'homme.

Le Gray (Gy)

L'unité de mesure de la dose absorbée est le Gray (Gy) qui correspond à l'énergie cédée par unité de masse. Cette unité permet donc de mesurer la quantité de rayonnements absorbés par un organisme ou un objet exposé aux rayonnements. Le Gray a remplacé le rad en 1986 : 1 gray = 100 rads = 1 joule par kilo de matière irradiée.

Le Sievert (Sv)

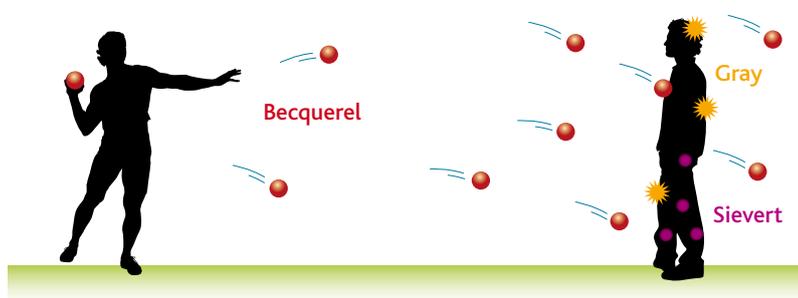
Les effets dus à la radioactivité sur les organismes vivants, ou sur la matière inerte, ne sont pas directement liés au Becquerel pour plusieurs raisons : la désintégration d'un atome de césium ou d'iode ne libère pas la même énergie ; les rayonnements émis sont de natures très différentes ; tous n'atteignent pas obligatoirement l'organisme de la même manière.

De plus, suivant les parties de l'organisme touchées par les rayonnements, les effets sont différents. Pour en tenir compte, la dose absorbée est multipliée par un facteur qui permet d'aboutir à la dose équivalente, exprimée en Sievert (Sv).

Certains tissus et organes sont donc plus sensibles au rayonnement que d'autres. Pour en tenir compte, la dose équivalente a été pondérée par un facteur de risque spécifique pour chaque tissu ou organe de manière à obtenir la dose effective (ou dose efficace). Ce système présente l'avantage de pouvoir placer tous les types d'exposition humaine au rayonnement ionisant sur une même échelle des risques. La valeur de la dose effective étant généralement très petite, elle est le plus souvent exprimée en milliSievert (mSv).

Très schématiquement, il est possible de mieux symboliser la relation entre ces trois unités avec l'image suivante : un enfant lance des balles en direction d'un camarade :

- le nombre de balles envoyées peut se comparer au nombre de rayonnements émis par une source radioactive, c'est-à-dire son activité (Becquerel) ;
- le nombre de balles reçues par son camarade représente la dose absorbée (Gray) ;
- les marques laissées sur son corps, selon que les balles sont plus ou moins lourdes et que les points touchés sont plus ou moins sensibles, sont l'effet produit, et peuvent se comparer à la dose efficace (Sievert).



Comment mesure-t-on la radioactivité ?

Les rayonnements issus de la radioactivité ne sont pas directement perceptibles. Aucun des sens dont dispose l'être humain n'est sensible aux rayonnements émis par les substances radioactives. La radioactivité est invisible, inaudible, inodore.

Toutes les 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 calculant, par unité de temps, le nombre d'ionisations ou d'excitations provoquées par les particules, il est possible de quantifier l'énergie transmise du 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.

La fonction de la plupart des détecteurs de rayonnements va donc être de séparer et de compter les ions (ou les électrons) produits par le passage d'un rayonnement au travers du détecteur et ceci au moyen d'un champ électrique imposé à ce détecteur. Généralement, le rayonnement va pénétrer dans le volume sensible du détecteur qui sera un matériau gazeux, solide ou liquide selon le type de rayonnements que l'on veut mesurer. L'interaction va produire une série d'événements discrets (électrons d'ionisation, photons, chaleur, etc).

Quel que soit le mode de fonctionnement d'un détecteur et donc le principe sur lequel s'appuie la détection des rayonnements, il est toujours constitué des mêmes éléments :

- un capteur au niveau duquel le rayonnement interagit avec la matière ;
- un système d'amplification qui met en forme et amplifie le signal produit par la sonde ;
- éventuellement un système de traitement du signal ;
- un système d'affichage qui indique :
 - un flux de particules : le compteur,
 - l'énergie des particules : le spectromètre,
 - la dose absorbée ou le débit de dose absorbée : le dosimètre ou le débitmètre.

Comprendre l'expression des résultats des mesures de radioactivité

Le bruit de fond

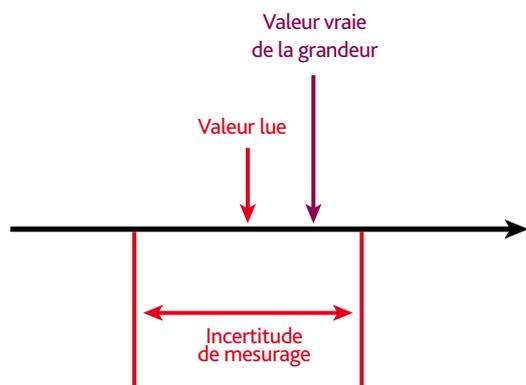
Le bruit de fond (bdf) en métrologie indique le niveau de comptage induit par l'environnement, la composition des réactifs et l'électronique de l'appareil. Il convient de soustraire ce bruit de fond (utilisation d'un « blanc ») à la valeur de mesure brute pour déterminer l'activité nette contenue dans un échantillon.

En terme environnemental, le bruit de fond représente un niveau d'activité mesurée à un point hors influence de toute source de radioactivité artificielle et dont on ne peut s'affranchir.

L'incertitude

L'incertitude de mesure, propre à une méthode, est un paramètre associé au résultat d'une mesure significative. Elle décrit l'étendue des valeurs possibles dans laquelle se trouve la valeur vraie avec une probabilité prédéfinie. L'incertitude de mesure découle des propriétés de l'instrument, de l'opérateur, de l'environnement de la mesure (température, vibrations), de la procédure de mesure...

La valeur lue sur l'instrument de mesure peut se situer sur toute la zone d'incertitude de mesurage et donc être plus ou moins proche de la valeur vraie de la grandeur mesurée.



Limite de détection et seuil de décision

Dans le cas de la recherche de très faibles activités, la mesure d'un échantillon peut donner un résultat très proche de celui obtenu lors de la détermination du bruit de fond de l'installation de mesure (signal détecté en l'absence du radionucléide recherché).

Compte tenu du caractère aléatoire du processus de désintégration radioactive, un résultat très légèrement supérieur au bruit de fond mesuré ne donne pas l'assurance totale d'une présence de radioactivité, pas plus qu'un résultat très légèrement inférieur à ce même bruit de fond ne garantit l'absence de cette radioactivité.

Pour se prononcer, l'analyste doit alors faire appel aux notions de seuil de décision et de limite de détection caractérisant sa technique de mesure.

Le **seuil de décision** (SD) correspond à une valeur de comptage, 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.

L'activité de l'échantillon et son incertitude peuvent alors être calculées.

Si par contre la mesure de l'échantillon donne un comptage inférieur à cette valeur SD, on peut seulement affirmer pour cet échantillon, également avec une probabilité quantifiée de ne pas se tromper, que même si une radioactivité est présente, bien que n'ayant pas été détectée, elle est en tous cas inférieure à une valeur appelée **limite de détection** (LD).

Selon les techniques de mesure, la limite de détection est approximativement égale à deux fois la valeur du seuil de décision.

LES EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS ET L'EXPOSITION EN FRANCE

Les effets biologiques des rayonnements ionisants

L'homme est donc exposé en permanence à des rayonnements d'origine naturelle ou artificielle. Les rayonnements ionisants sont émis lors de la désintégration de ces radionucléides qui donne naissance à de nouveaux éléments, radioactifs ou non. Ils se présentent sous la forme de particules (alpha, neutrons ou bêta) ou de rayonnements électromagnétiques (rayons X et rayonnements gamma). Ils sont appelés ionisants car l'énergie qu'ils génèrent est suffisamment importante pour ioniser les molécules.

Cette énergie peut entraîner des modifications de la matière vivante, au niveau cellulaire où ces rayonnements induisent des lésions. Deux approches sont utilisées pour étudier leurs différents effets biologiques : l'épidémiologie et l'expérimentation sur des molécules ou cellules d'organismes vivants. Les effets des rayonnements ionisants sur l'organisme varient en fonction de la dose reçue et de différents facteurs : la source (activité ou intensité de fonctionnement, nature, énergie...), le mode d'exposition (temps, débit...) et la cible (tissus ou organes touchés, âge de l'individu...).

Il existe deux types d'effets biologiques :

- **les effets immédiats** (ou déterministes) : une forte irradiation par des rayonnements ionisants provoque des effets immédiats sur les organismes vivants comme, par exemple, des brûlures plus ou moins importantes. En fonction de la dose et selon l'organe touché, le délai d'apparition des symptômes varie de quelques heures (nausées, radiodermite) à plusieurs mois. Des effets secondaires peuvent même être observés des années après une irradiation (fibroses, cataracte) ;
- **les effets à long terme** (effets aléatoires ou stochastiques) : les expositions à des doses plus ou moins élevées de rayonnements ionisants peuvent avoir des effets à long terme sous la forme de cancers et de leucémies. La probabilité d'apparition de l'effet augmente avec la dose. Le délai d'apparition après l'exposition est de plusieurs années.

Une pathologie radioinduite n'a pas de signature particulière : il n'existe pas de marqueur biologique permettant de différencier, par exemple, un cancer pulmonaire dû au tabac, d'un cancer pulmonaire radioinduit.

Quels sont les effets sur la santé humaine d'une exposition à de faibles doses ?

En l'absence d'effets directement mesurables, les risques liés aux faibles niveaux d'exposition sont estimés en extrapolant les données issues de l'étude des survivants irradiés lors des explosions d'Hiroshima et de Nagasaki, ou des patients soumis à une radiothérapie, pour lesquels les paramètres d'exposition (dose, débit de dose...) sont très différents.

Même s'il existe une relation entre l'exposition aux rayonnements ionisants et l'excès de cancers solides, cette relation n'a pas été démontrée pour de très faibles doses. À l'heure actuelle, les effets sur la santé humaine d'une exposition à des doses inférieures à 100 mSv font l'objet de débats scientifiques.

La radioprotection

La radioprotection est l'ensemble des mesures destinées à assurer la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les rayonnements. Pour se protéger, les trois règles principales sont :

- s'éloigner des sources d'irradiation ;
- mettre un ou plusieurs écrans entre la source et les personnes exposées ;
- minimiser le temps d'exposition.

Les modes d'exposition aux rayonnements

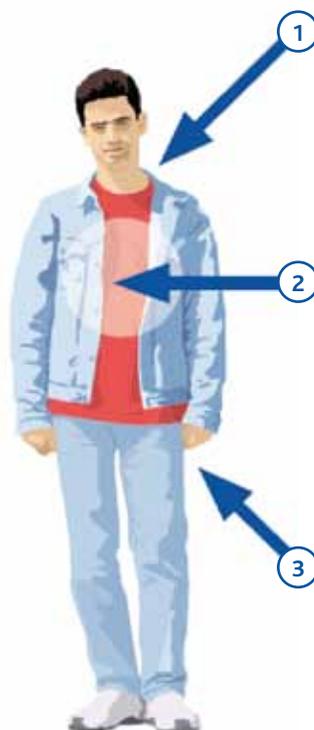
Selon la manière dont les rayonnements atteignent l'organisme, on distingue deux modes d'exposition : externe ou interne.

L'exposition externe : la source de rayonnement n'est pas en contact direct avec la personne et la dose reçue ne correspond qu'au temps pendant lequel s'est produite l'exposition. L'exposition externe de l'homme aux rayonnements provoque une irradiation externe. Elle a lieu lorsque celui-ci se trouve exposé à des sources de rayonnements qui lui sont extérieures (substances radioactives sous forme de nuage ou de dépôt sur le sol, sources à usage industriel ou médical...). L'exposition externe peut concerner tout l'organisme ou une partie seulement de celui-ci.

L'exposition interne : le radionucléide pénètre à l'intérieur de l'organisme le plus souvent par ingestion ou par inhalation, mais également par une brèche cutanée ou par voie veineuse (par exemple lors d'une scintigraphie) ; on parle alors de contamination interne. La distribution dans l'organisme dépend de la nature du radionucléide. L'exposition résulte des atomes radioactifs présents dans les tissus ou organes ; elle continue donc au-delà du moment où a eu lieu l'incorporation,

mais décroît en fonction de la période radioactive du radionucléide incorporé et de sa biocinétique.

Une exposition peut être **brève** (par exemple radiographie) ou **prolongée** (par exemple exposition naturelle).



- ① Exposition externe due aux rayonnements de l'air
- ② Exposition interne après inhalation et ingestion d'éléments contaminés
- ③ Exposition externe due aux rayonnements des dépôts

■ X.2 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS DE CE BILAN

La plus grande partie des résultats présentés dans ce bilan sous forme de graphiques ou de tableaux synthétiques sont des valeurs moyennes des résultats obtenus sur l'année.

En outre :

- 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 (*voir paragraphe suivant*). À cette moyenne est associée une incertitude ;
- les résultats sont assortis de commentaires faisant référence aux mesures acquises antérieurement. Dans cette édition 2009, le bilan fait ressortir certaines de ces séries chronologiques à travers des focus spécifiques.

Expression des résultats sous forme de valeurs moyennes

Pour restituer dans ce bilan ses mesures de la radioactivité dans l'environnement de manière plus synthétique et représentative, l'IRSN a choisi d'exprimer les résultats acquis annuellement sous la forme d'un estimateur unique qui tient compte de toutes les valeurs acquises en un point au cours de l'année écoulée, 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 :

Moyenne pondérée :
$$m = \frac{\sum \frac{1}{u_i^2} Y_i}{\sum \frac{1}{u_i^2}}$$

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 :

| Échantillon | Résultat | Incertitude | Unité |
|-------------|----------|-------------|-------|
| A1 | 130 | 20 | Bq/L |
| A2 | 140 | 10 | |
| A3 | < 160 | | |

Le tableau des résultats pour le calcul de la moyenne pondérée est le suivant :

| Échantillon | Résultat | Incertitude | Unité |
|-------------|----------|-------------|-------|
| A1 | 130 | 20 | Bq/L |
| 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.

■ X.3 GLOSSAIRE

Actinide : élément chimique du tableau périodique se situant entre l'actinium et le lawrencium, c'est-à-dire possédant un numéro atomique compris entre 89 et 103 inclus. L'uranium et le thorium sont des actinides d'origine naturelle. Le plutonium est un actinide d'origine artificielle.

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.

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.

ANDRA : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

ASN : Autorité de sûreté nucléaire.

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, 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.

Bruit de fond (bdf) : en métrologie, 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 terme environnemental, 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.

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 (DPI), 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 (radio-sensibilité). Les coefficients de dose DPI 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.

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.

CSP : Code de la santé publique français.

DDASS : Direction départementale des affaires sanitaires et sociales.

DDSV : Direction départementale des services vétérinaires.

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).

DGAL : Direction générale de l'alimentation.

DGCCRF : Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes.

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. 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.

DRASS : Direction régionale des affaires sanitaires et sociales.

EDF : Électricité de France.

Effluent : tout gaz ou liquide, qu'il soit radioactif ou non, issu des installations.

Émissaire : exutoire des effluents rejetés par une installation.

EURODIF : Usine européenne d'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse.

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.

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.

Hydrotéléray : réseau IRSN de mesure en continu *in situ* de l'activité gamma dans les principaux fleuves en aval des installations.

ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement.

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.

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 (milligramme par litre). Un gramme de potassium naturel a une activité (β/γ) de 31 Bq due à la décroissance de l'isotope radioactif de masse 40 (^{40}K).

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.

OMS : Organisation mondiale de la santé.

ONIGC : Office national interprofessionnel des grandes cultures, devenu France Agrimer en mars 2009.

OPERA-Air : Observatoire permanent de la radioactivité de l'environnement dans l'air regroupant des stations « AS » et « TGD ».

Période (ou demi-vie) : temps au bout duquel l'activité du radionucléide a diminué de moitié. La période varie d'un radionucléide à l'autre.

Produits de fission : fragments de noyaux lourds produits par la fission nucléaire ou la désintégration radioactive ultérieure de nucléides formés selon ce processus.

Radioactivité : propriété de certains éléments dont les noyaux se désintègrent spontanément pour former d'autres éléments en émettant des rayonnements ionisants.

Radioélément : élément radioactif naturel ou artificiel.

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.

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.

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.

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.

Station AS : station de prélèvement d'aérosols au niveau du sol (Air au Sol).

Station TGD : station de prélèvement d'aérosols à « très grand débit ».

Stérile minier : zone minérale dont l'exploitation est jugée non rentable en raison de sa faible concentration.

Téléhydro : dispositif IRSN de mesure en continu de l'activité gamma dans les eaux usées.

Téléray : réseau IRSN de mesure en continu du débit de dose gamma ambiant.

Transuraniens : élément chimique dont le numéro atomique est supérieur à celui de l'uranium (92). Ceux dont le numéro atomique est compris entre 93 et 118 sont tous des radioéléments.

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 »).

Yellow cake : concentré d'uranium (U_3O_8) produit en amont du procédé d'obtention de combustible nucléaire, après extraction du minerai.

■ X.4 RÉFÉRENCES

Avis sur le suivi radioécologique des eaux autour des installations nucléaires et sur la gestion des anciens sites d'entreposage de déchets radioactifs – 18 recommandations pour améliorer l'information, la transparence et la concertation avec les parties prenantes, Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN), 2008, rapport du 6 novembre 2008 disponible sur www.hctisn.fr

Bilan radiologique de l'environnement français – synthèse des résultats de surveillance des réseaux de surveillance de l'IRSN, collectif IRSN/DEI, rapports IRSN/DEI/SESURE 2005-33 (2004), 2007-30 (2005), 2007-72 (2006), 2008-48 (2007), 2009-04 (2008)

Bilan de la surveillance de la radioactivité en Polynésie française en 2009, résultats du réseau de surveillance de l'IRSN, Bouisset P., 2010, rapport IRSN/DEI/SESURE 2010-24

Constat radiologique régional, étude prototype « Val de Loire », Roussel-Debet S., 2010, rapport IRSN DEI/SESURE/2010-22

Constat radiologique régional, objectifs et méthode – application à la Vallée du Rhône, Roussel-Debet S., Antonelli C., 2010, rapport IRSN/DEI/SESURE/2010-01

Évaluations dosimétriques relatives aux options de gestion de l'environnement contaminé en carbone 14 autour de l'ancien laboratoire de la société Isotopchim à Ganagobie, Roussel-Debet S., 2009, rapport DEI/SESURE 2009-40

Exposition de la population française aux rayonnements ionisants, Rannou A., Aubert B., Scnaff P., 2006, rapport IRSN/DRPH/SER 2006-02

Fast hydrodynamic model for of medium- and long-term dispersion in seawater in the English Channel and southern North Sea, qualitative and quantitative validation by radionuclide tracers. Bailly du Bois P., Dumas F., 2005. *Ocean Modelling*, Vol 9/2, pp.169-210

Flux de radioactivité exportés par le Rhône en Méditerranée en 2008 – station observatoire du Rhône en Arles (SORA), Antonelli C., 2010, rapport IRSN/DEI/SESURE 2010-04

Estimating biological half-lives of radionuclides in marine compartments from environmental time-series measurements. Fiévet B., Plet D., 2002. *Journal of Environmental Radioactivity* 65, 91-107

Inventaire national des sites miniers – septembre 2007 – version 2 réalisée dans le cadre du programme MIMAUSA (Mémoire et impact des mines d'uranium : synthèse et archives) – rapport IRSN/MEEDDAT

IRSN fiches « radionucléide et environnement » – IRSN/DEI/SECRE disponibles sur : www.irsn.fr/FR/larecherche/Information_scientifique/Publications_Documentation/Pages/Documentation-scientifique-2514.aspx

La qualité radiologique de l'eau mise en distribution en France – 2005 à 2007 – rapport ASN-DGS-IRSN, juin 2009 disponible sur le portail Internet de l'IRSN

La radioactivité de l'environnement : le bruit de fond et ses origines ; l'influence du fonctionnement normal actuel des installations nucléaires, Renaud P., 2009, congrès SFRP Angers juin 2009

Le tritium dans l'environnement, collectif IRSN/DEI, 2010 rapports IRSN/DEI 2009-05 et IRSN/DEI 2010-01

Les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl sur le territoire français, Renaud P., Champion D., Brenot J., 2007, éditions Lavoisier

Livre blanc du tritium – groupe de réflexions menées de mai 2008 à avril 2010 sous l'égide de l'ASN, Autorité de sûreté nucléaire, 2010, disponible sur le portail Internet www.asn.fr, rubrique publications

Portail Internet Environnement de l'IRSN : environnement.irsn.fr

Portail Internet du Réseau national de mesures de la radioactivité dans l'environnement : www.mesure-radioactivite.fr/public

Radioactivité d'origine naturelle dans l'environnement en France, niveaux non perturbés par l'homme, rapport DPRE/SERNAT 2001-11, 45 p.

Synthèse des études radioécologiques annuelles, Duffa C., Masson O., Gontier G., Claval D., Renaud P., 2004, *Radioprotection* Vol 39 – n°2

Le Bilan de l'état radiologique de l'environnement français publié par l'IRSN est coordonné par le Laboratoire de veille radiologique de l'environnement (LVRE).

Cette synthèse annuelle reprend et commente les résultats les plus importants acquis dans le cadre de la mission de surveillance radiologique de l'environnement de l'IRSN. Ce programme de surveillance du territoire nécessite les compétences techniques et les moyens métrologiques de plusieurs laboratoires de l'Institut :

- le laboratoire de veille radiologique de l'environnement ;*
- 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 de la radioactivité naturelle ;*

La réalisation des prélèvements d'échantillons répartis sur l'ensemble du territoire ne pourrait se faire sans la contribution de nombreux correspondants :

- les services techniques des exploitants du nucléaire et des centres de recherches ;*
- Météo France ;*
- la Marine nationale ;*
- des institutions locales et des services déconcentrés de l'État (mairies, préfetures, 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/DEI/SESURE/LVRE

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
Crédit photos : IRSN et M. Lafontan / O. Seignette
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

**Direction de l'environnement
et de l'intervention**
31, rue de l'Écluse
BP 40035
78116 Le Vésinet Cedex

Téléphone
+33 (0)1 30 15 52 00