

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de juin 2011 à décembre 2014



© David Clava / Irsn



réseau national

Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement

SOMMAIRE

01 LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	4
1.1. OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	6
1.2. LES DISPOSITIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	8
La surveillance du compartiment atmosphérique	8
La surveillance du compartiment aquatique	13
La surveillance du compartiment terrestre	17
Synthèse des critères stratégiques et des dispositifs de prélèvement et de mesure associés à la surveillance radiologique des différents compartiments de l'environnement	20
1.3. DU PLAN DE PRÉLÈVEMENT AUX RÉSULTATS DE MESURE	22
1.4. LE RÉSEAU NATIONAL DE MESURES DE LA RADIOACTIVITÉ DE L'ENVIRONNEMENT (RNM)	25
Contexte et objectifs	25
Qui transmet les mesures de radioactivité de l'environnement au réseau national ?	27
Essais interlaboratoires et agréments délivrés par l'ASN	27
L'agrément des laboratoires de mesures de la radioactivité de l'environnement	29
Le système d'information du Réseau national et son site Internet	32
02 LE « BRUIT DE FOND » RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	34
2.1. SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENT ET D'EXPOSITION	36
Les radionucléides telluriques dans l'environnement	37
Les radionucléides cosmogéniques dans l'environnement	42
2.2. EXPOSITION DE LA POPULATION AUX SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENT	46
Débit de dose dans l'air et doses externes efficaces individuelles	46
Dose par ingestion de radionucléides naturels <i>via</i> l'alimentation et le tabagisme	50
Dose par inhalation de radon	51
2.3. RÉMANENCE DES RETOMBÉES RADIOACTIVES ANCIENNES ET EXPOSITIONS ASSOCIÉES	53
Retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires	53
Retombées de l'accident de Tchernobyl	56
Retombées de l'accident de Fukushima	57
2.4. GAMME DES DOSES LIÉES AU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	60
03 DONNÉES RELATIVES AUX DIFFÉRENTS SITES NUCLÉAIRES FRANÇAIS	62
3.1. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE (CNPE) EN EXPLOITATION	64
Les rejets	64
Les plans de surveillance de l'environnement d'un CNPE	64
Influence des CNPE sur leur environnement et expositions du public associées	69
3.2. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE EN COURS DE DÉMANTÈLEMENT	82
Le site de Creys-Malville	82
Le site de Brennilis	87
3.3. LES SITES INDUSTRIELS	90
Le site de Malvézi	90
Le site du Tricastin	96
Le site de Romans-sur-Isère	106
Le site de La Hague	112
Le centre de stockage de l'Aube et le centre de stockage de Morvilliers	140

3.4. LES SITES DE RECHERCHE	148
Le site de Marcoule	148
Le site de Valduc	164
Le site de Cadarache	174
Le site de Grenoble	178
Le site de Bruyères-le-Châtel	184
Le site de Saclay	188
Le site de Fontenay-aux-Roses	198
3.5. LES BASES NAVALES NUCLÉAIRES	204
Ports militaires de Brest et de l'Île-Longue	204
Port militaire de Cherbourg	204
Port militaire de Toulon	205
La surveillance radiologique de l'environnement	206
Influence des sites sur l'environnement	207
3.6. LES ANCIENS SITES MINIERS	210
Plan de surveillance	211
Sites de la Crouzille (Haute-Vienne)	212
Le Vénachat (bassin versant du Ritord)	213
Sites de Bessines (bassin-versant de La Gartempe)	214
Sites miniers de Saône-et-Loire	215
Sites miniers de la Vendée	215
Évaluation de l'impact des anciens sites miniers	215
3.7. SYNTHÈSE DES ÉVALUATIONS DOSIMÉTRIQUES	216

04 COMPRENDRE LA RADIOACTIVITÉ ET LES EXPOSITIONS DES PERSONNES QU'ELLE ENGENDRE	220
Les radionucléides	222
Les rayonnements	223
L'activité : les becquerels (Bq)	223
La période radioactive	224
Les modes d'exposition à la radioactivité environnementale	224
La dose : le Sievert (Sv)	226
La radioprotection	229

05 LES SOURCES D'INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ ET LA DIFFUSION DE DONNÉES	230
------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

5.1. SITES INTERNET ET SUPPORTS D'INFORMATION DU PUBLIC	232
Portail internet du réseau national de mesures (RNM) de la radioactivité de l'environnement	232
Site internet de l'IRSN	233
Sites internet des principaux producteurs de données et des acteurs intéressés	234
Supports d'information de l'autorité de sûreté nucléaire	237
Le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire	237
Rapports « environnement » des installations nucléaires	238
5.2. DIFFUSION D'INFORMATION DANS LE CADRE DE TRAITÉS OU CONVENTIONS INTERNATIONALES	238
La diffusion des données françaises dans le cadre du traité Euratom	238
Les données transmises à la commission OSPAR	239

06 ANNEXES	240
6.1. PRÉSENTATION ET EXPLOITATION DES RÉSULTATS	242
6.2. GLOSSAIRE	244
6.3. COMITÉ ÉDITORIAL	252



© A. Chézère/CEA



01

LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

1.1. OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	6
1.2. LES DISPOSITIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	8
La surveillance du compartiment atmosphérique	8
La surveillance du compartiment aquatique	13
La surveillance du compartiment terrestre	17
Synthèse des critères stratégiques et des dispositifs de prélèvement et de mesure associés à la surveillance radiologique des différents compartiments de l'environnement	20
1.3. DU PLAN DE PRÉLÈVEMENT AUX RÉSULTATS DE MESURE	22
1.4. LE RÉSEAU NATIONAL DE MESURES DE LA RADIOACTIVITÉ DE L'ENVIRONNEMENT (RNM)	25
Contexte et objectifs	25
Qui transmet les mesures de radioactivité de l'environnement au réseau national ?	27
Essais interlaboratoires et agréments délivrés par l'ASN	27
L'agrément des laboratoires de mesures de la radioactivité de l'environnement	29
Le système d'information du Réseau national et son site Internet	32

01

LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

1.1. OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

De nombreux acteurs participent à la surveillance radiologique de l'environnement français :

- les exploitants d'installations nucléaires (ANDRA¹, AREVA¹, CEA¹, EDF¹, ILL¹ et Marine Nationale¹) qui réalisent une surveillance autour de leurs sites nucléaires ;
- l'IRSN¹, l'ASN¹, les ministères (santé, DGAL¹, DGCCRF¹...), les services de l'État et les autres acteurs publics qui ont pour mission de réaliser une surveillance du territoire national ou qui réalisent des missions de contrôle ou de surveillance sur des secteurs particuliers (les denrées alimentaires pour ce qui concerne par exemple les ministères chargés de l'agriculture et de la consommation) ;

- les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA¹), les collectivités locales, les associations (CLI¹, associations de protection de l'environnement) qui réalisent des surveillances indépendantes des pouvoirs publics.

Cette pluralité des acteurs permet un partage de la surveillance entre, d'une part, l'IRSN et les acteurs publics qui assurent une surveillance du territoire à l'échelle régionale ou nationale et, d'autre part, les exploitants qui exercent une surveillance autour de leurs installations nucléaires. Les autres acteurs publics et les associations permettent de renforcer et de crédibiliser l'ensemble du système de surveillance, notamment de vérifier la cohérence des résultats des mesures réalisées.



Analyse par spectrométrie alpha

© Y. Geoffroy/Areva

1. Voir Glossaire du chapitre 6.2.

La surveillance radiologique de l'environnement répond à différents objectifs

• Objectif n° 1

Contribuer à la connaissance de l'état radiologique de l'environnement et de son évolution par la caractérisation des différents radionucléides présents dans ses différentes composantes, par la quantification de leurs niveaux d'activités, et par un suivi de l'évolution spatiale et temporelle permettant de détecter une élévation de la radioactivité d'origine artificielle jusqu'à plusieurs ordres de grandeur inférieurs aux fluctuations de la radioactivité ambiante d'origine naturelle.

• Objectif n° 2

Contribuer à l'évaluation des expositions radiologiques dans un objectif de protection sanitaire des populations et de l'environnement, notamment à l'évaluation des doses, par la connaissance de l'état radiologique des différentes composantes de l'environnement : air, sols, eaux, denrées...

• Objectif n° 3

Détecter le plus précocement possible une élévation anormale de la radioactivité environnementale, assurer son suivi, déterminer son origine (naturelle ou installation nucléaire) et identifier l'installation s'il s'agit d'un rejet intempestif.

• Objectif n° 4

Vérifier le respect des prescriptions applicables aux installations exerçant une activité nucléaire en identifiant en cas de dépassement de seuils prédéfinis, la nature et l'origine des substances détectées, et en contribuant à vérifier que l'impact radiologique des installations reste inférieur aux valeurs limites fixées par la réglementation.

• Objectif n° 5

Contribuer par la restitution des résultats de la surveillance, par l'agrément des laboratoires et par la pluralité des acteurs, à la transparence et à l'information du public.

Si un seul résultat de mesure ne répond pas forcément aux cinq objectifs, l'ensemble des mesures effectuées par les différents acteurs participe directement ou indirectement aux cinq objectifs de la surveillance de l'environnement. Chaque acteur met en œuvre non pas une, mais des modalités de surveillance (surveillance de routine et expertises par exemple) qui répondent chacune à des objectifs particuliers.

La surveillance autour des sites nucléaires vient en complément du contrôle des rejets par les exploitants. Toutefois, le contrôle des effluents rejetés ne permet pas de s'affranchir d'une surveillance de l'environnement.

1.2. LES DISPOSITIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

La surveillance radiologique de l'environnement en France s'appuie sur deux approches complémentaires :

- La surveillance en continu in situ par des systèmes autonomes (réseaux de télésurveillance) permettant la transmission en temps réel des résultats. Ces dispositifs sont principalement utilisés pour donner l'alerte en cas d'accident de grande ampleur. Parmi ces systèmes, on trouve notamment :
 - les réseaux des balises de débit de dose gamma ambiant (ex. : réseau Téléray pour l'IRSN) ;
 - le réseau Hydrotéléray de l'IRSN pour la surveillance des principaux cours d'eau par spectrométrie gamma, en aval de toutes les installations nucléaires et avant leur sortie du territoire national.
- Le traitement et la mesure en laboratoire d'échantillons prélevés dans différents compartiments de l'environnement d'installations autorisées à rejeter des radionucléides. Le prélèvement des échantillons s'effectue *via* deux méthodes :
 - des prélèvements ponctuels d'échantillons environnementaux. Ces échantillons concernent des matrices variées : les eaux (de pluies, douces de surface, souterraines ou marines), les indicateurs biologiques (mousses, algues), les sols et les sédiments, ainsi que les denrées (lait et produits laitiers, viande, poisson, mollusques, crustacés, céréales...) ;
 - des dispositifs de prélèvement en continu. Ces prélèvements concernent essentiellement les mesures effectuées dans le compartiment atmosphérique (aérosols, mesures de radionucléides spécifiques dans l'air comme le tritium et le carbone 14) et dans les eaux de surface (prélèvements par hydrocollecteurs).

Le choix des modalités de surveillance dépend de l'objectif recherché, des performances attendues et des contraintes liées aux mesures (présence d'interférent, temps de comptage, etc.).

Les dispositifs de prélèvements et de mesures déployés, et les types de mesure effectués en France par les nombreux acteurs qui participent à la surveillance radiologique de l'environnement

sont donc parfois très différents. Certains dispositifs sont adaptés aux objectifs recherchés par les exploitants nucléaires dans le cadre de la surveillance réglementaire de leurs installations, tandis que d'autres acteurs utilisent des équipements de prélèvement et des techniques de mesures beaucoup plus performants permettant d'atteindre des seuils de décision (cf. page 23) nettement plus bas. Dans la base de données du RNM, cela se traduit par la coexistence de résultats issus de sources différentes et obtenus selon des gammes analytiques différentes.

Une présentation détaillée des différents dispositifs de prélèvements puis des techniques de mesure utilisées en France par les différents laboratoires est donc nécessaire afin de mieux comprendre la diversité des résultats présentés dans ce bilan radiologique.

La surveillance du compartiment atmosphérique

La surveillance du compartiment atmosphérique est assurée par deux types de réseaux : les réseaux de mesure en continu d'une part, et les dispositifs de prélèvement en continu (air, gaz, eau de pluie) avec des mesures réalisées en différée au laboratoire d'autre part.

• Mesure en continu du débit de dose gamma ambiant

Les réseaux de mesure du débit de dose gamma ambiant constituent les principaux réseaux de mesures en continu de l'exposition aux rayonnements ionisants en France. Ces dispositifs, équipés de seuils de pré-alarme et d'alarme et reliés à des systèmes de supervision et d'astreinte, sont destinés à l'alerte en cas d'accident de grande ampleur sur un site nucléaire. Ils permettent une évaluation instantanée de la situation et de son évolution. Ces balises (cf. figure 1) sont déployées par l'IRSN sur l'ensemble du territoire français et outre-mer mais présentent une densification beaucoup plus forte autour des sites nucléaires dont les exploitants (EDF, CEA, AREVA, ANDRA, Marine nationale, ILL, etc.) assurent la couverture de la zone située entre 0 et 10 km, tandis que l'IRSN complète le dispositif de surveillance dans un rayon compris entre 10 km et 30 km.

FOCUS
LES TRAVAUX DU GROUPE
DE TRAVAIL « STRATÉGIE
DE SURVEILLANCE
DE LA RADIOACTIVITÉ
DE L'ENVIRONNEMENT »
PILOTÉ PAR L'ASN EN
COORDINATION AVEC L'IRSN.

La constitution du Groupe de travail (GT) « stratégie de surveillance de la radioactivité de l'environnement » a été décidée au cours du 5^e comité de pilotage du Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM). Ce groupe rassemble les principaux acteurs de la mesure de la radioactivité de l'environnement ainsi que des demandeurs publics et associatifs d'informations sur la situation radiologique et l'impact dosimétrique.

Les travaux du groupe de travail sur la stratégie de surveillance de la radioactivité de l'environnement ont permis de dresser un état des lieux détaillé de la surveillance de la radioactivité de l'environnement effectuée sur le territoire national et en particulier autour des sites nucléaires par l'ensemble des acteurs concernés.

Un inventaire précis des caractéristiques de la surveillance réglementaire actuelle, des dispositifs de prélèvement et de mesure associés, des méthodes de mesures utilisées ainsi que des performances analytiques atteintes a été réalisé. Pour certains types de mesures, les pratiques en Europe ont également été analysées, en particulier pour la surveillance du compartiment atmosphérique. Un inventaire des textes de référence et normatifs applicables a enfin été effectué dans le cadre des travaux de ce GT.

L'analyse de la surveillance s'est appuyée sur le rapport de l'IRSN sur la pertinence des analyses radiologiques environnementales pour la surveillance réglementaire effectuée par les exploitants d'installations nucléaires de base, réalisé à la demande de l'ASN, et sur des présentations d'études effectuées par les différents membres du GT. Ces éléments ont servi de base aux discussions du groupe de travail. L'analyse de la base de données du RNM qui rassemble les résultats de mesures effectuées en France depuis 2009 a permis de compléter les données communiquées par les différents acteurs.

Le cadre réglementaire qui porte l'organisation du RNM a permis de consolider la fiabilité et la qualité des mesures réalisées qui satisfont aux objectifs de surveillance. Le groupe de travail a souligné en préambule que la surveillance radiologique de l'environnement actuellement réalisée par l'ensemble des acteurs était particulièrement importante. Elle couvre l'ensemble des compartiments de l'environnement et plus de 1 500 000 résultats de mesures sont désormais disponibles dans la base de données du RNM qui est régulièrement renseignée depuis 2009.

Des propositions d'harmonisation ou d'évolutions ont été énoncées sur la surveillance effectuée par les exploitants d'installations nucléaires. Certains points n'ont cependant pas pu être approfondis ou n'ont pas fait l'objet de consensus au sein du groupe de travail. D'autres ont été mis en œuvre en particulier dans la réglementation dans le cadre de la décision ASN n° 2013-DC-0360 du 16 juillet 2013.

- **Dosimétrie passive environnementale**

La surveillance en temps réel présentée précédemment peut être complétée en France par une surveillance par dosimétrie passive (cf. figure 1) effectuée à l'aide de dosimètres thermo-luminescents (DTL) ou de dosimètres radio-photo-luminescents (RPL) implantés sur

le périmètre des sites nucléaires (pour les exploitants) ou couvrant l'ensemble du territoire national en ce qui concerne le réseau RPL de l'IRSN récemment redéployé. L'objectif est de s'assurer a posteriori (temps d'intégration mensuel à trimestriel puis analyse différée en laboratoire) du respect de la réglementation.

FIGURE 1 / **SONDE DE MESURE EN CONTINU DU DÉBIT DE DOSE GAMMA AMBIANT DU RÉSEAU TÉLÉRAY DE L'IRSN (PHOTO DU HAUT) ET DOSIMÈTRE RPL INSTALLÉ SUR LE SITE DE CADARACHE (PHOTO DU BAS)**



© A. Bouisson/MEDDTL/IRSN



© DR

• Aérosols atmosphériques

En France, la surveillance radiologique des aérosols à l'échelle nationale est assurée par l'IRSN. Les exploitants nucléaires et les associations contribuent localement à cette surveillance. Ce dispositif repose sur des prélèvements d'aérosols sur des filtres prélevés quotidiennement ou une fois par semaine, et sur des analyses différées de ces filtres en laboratoire.

En fonction des objectifs fixés et donc des performances recherchées, différents types de dispositifs de prélèvement sont déployés au niveau national (cf. figure 2). Ils diffèrent principalement par le débit d'aspiration de l'air. La plupart des stations ont un débit de 4 à 80 m³/h (bas à moyen débit) et une vingtaine de stations (IRSN, CEA, Marine nationale) sont équipées de dispositifs de prélèvement à débit supérieur (entre 100 et 700 m³/h).

Réglementairement, les exploitants nucléaires réalisent sur les filtres prélevés quotidiennement une mesure de l'indice d'activité bêta global et, pour certains sites, une mesure de l'indice d'activité alpha global. La mesure de cet indice² est destinée à détecter toute anomalie importante dans l'activité de l'air et de déclencher alors des investigations complémentaires.

Ainsi, si la valeur de l'indice d'activité bêta global dépasse 2 mBq/m³ d'air, une analyse par spectrométrie gamma est exigée par la réglementation. La spectrométrie gamma permet alors de préciser le ou les radionucléides responsables de ce dépassement et s'il s'agit d'un radionucléide artificiel rejeté par l'installation, d'évaluer les conséquences radiologiques correspondantes.

La réglementation prévoit également que l'indice d'activité bêta global dans l'air ne doit pas du fait de rejets normaux de l'installation, dépasser une certaine limite.

L'IRSN et certains exploitants nucléaires réalisent systématiquement une spectrométrie gamma sur les filtres d'aérosols. Les performances sont liées principalement au débit d'aspiration et à la durée de la mesure. À titre d'exemple, une station bas débit permet de mesurer des activités de césium 137 dans l'air de l'ordre de 5 mBq/m³ ; une station haut débit permet de descendre autour de 0,00005 mBq/m³ pour les stations IRSN avec un débit de 700 m³/h. Ce dernier type de station permet ainsi de mesurer le bruit de fond résiduel du césium 137 dans l'air, de l'ordre de 0,0002 mBq/m³ (cf. chapitre 2), et donc de détecter toute augmentation si faible soit-elle de ce bruit de fond.

FIGURE 2 / EXEMPLES DE DISPOSITIFS DE PRÉLÈVEMENT D'AÉROSOLS ATMOSPHÉRIQUES

Préleveur 700 m³/h à gauche, préleveur 80 m³/h au centre, préleveur 10 m³/h à droite.



2. L'indice d'activité bêta global (ou alpha global) est un indice destiné à détecter une augmentation de l'ambiance radioactive d'un milieu (air, eau ou matrice biologique) potentiellement liée à un rejet intempestif d'une installation nucléaire. L'indice d'activité bêta (ou alpha) global ne correspond pas à la somme des activités des radionucléides émetteurs bêta (respectivement alpha) contenus dans l'échantillon analysé et ne permet pas de déterminer les radionucléides en présence.

- **Rejets atmosphériques des installations nucléaires**

Le tritium et le carbone 14 sont les principaux radionucléides rejetés dans l'air par les installations nucléaires.

Le prélèvement du tritium atmosphérique est réalisé par barbotage de l'air aspiré dans des pots barboteurs remplis d'eau (cf. figure 3). La mesure du tritium atmosphérique est déterminée à partir de la mesure du tritium de l'eau des barboteurs. Deux types de dispositifs sont utilisés dans le cadre de la surveillance en continu des installations : des dispositifs dotés de 2 pots permettant uniquement la mesure du tritium atmosphérique sous forme de vapeur d'eau (tritium HTO), et des dispositifs munis de 4 pots barboteurs permettant d'accéder à la mesure du tritium HTO (2 premiers barboteurs) et des autres formes du tritium atmosphérique, dont le tritium gazeux HT, dans les 2 derniers pots placés en aval d'un four d'oxydation. Cette surveillance est principalement réalisée par les exploitants nucléaires avec des mesures hebdomadaires par scintillation liquide (cf. figure 2) dont les résultats oscillent globalement entre 0,05 et 1,5 Bq/m³ (la valeur du bruit de fond du tritium atmosphérique varie de 0,005 à 0,01 Bq/m³, cf. chapitre 2).

FIGURE 2 / APPAREIL DE MESURE PAR SCINTILLATION LIQUIDE



© IRSN

Le prélèvement de carbone 14 s'effectue par barbotage de l'air aspiré dans de la soude afin de piéger le CO₂ sous forme de carbonates. Outre le CO₂ piégé dans les 2 premiers pots, ces dispositifs à 4 pots piègent également les autres formes carbonées présentes dans l'air (CH₄...) dans les 2 pots placés après un four catalytique. Différentes techniques d'analyse du carbone 14 sont utilisées. La principale technique consiste à mesurer le carbone 14, sous différentes formes, par scintillation liquide. Les activités volumiques obtenues suite aux mesures réalisées sur ces prélèvements hebdomadaires à mensuels sont généralement comprises entre 0,02 et 0,1 Bq/m³ (le bruit de fond du carbone 14 atmosphérique en France se situe entre 0,02 et 0,06 Bq/m³, cf. chapitre 2).

FIGURE 3 / BARBOTEURS POUR LE PRÉLÈVEMENT DU TRITIUM OU DU ¹⁴C ATMOSPHÉRIQUE



© DR

Pour le tritium comme pour le carbone 14, certains acteurs qui participent à la mesure de ces radionucléides utilisent des méthodologies permettant d'atteindre ou de s'approcher des valeurs de bruit de fond, notamment par l'utilisation de méthodes d'analyses et de temps de comptage adaptés. Les seuils de décision³ obtenus par les autres acteurs, notamment dans le cadre des mesures de routine, sont cependant cohérents avec les objectifs visés par la surveillance des installations nucléaires.

D'autres radionucléides présents dans les rejets atmosphériques de certaines installations sont également prélevés et mesurés tels que l'iode atmosphérique (gazeux et particulaire) et le krypton 85 (gaz rare rejeté essentiellement par l'usine Areva de La Hague).

3. Le seuil de décision est la valeur minimale que doit avoir la mesure d'un échantillon pour que le métrologue puisse « décider » que cette activité est présente et donc mesurée. En dessous de cette valeur, l'activité de l'échantillon est donc trop faible pour être estimée. Ce seuil de décision dépend de la performance et du rayonnement ambiant autour des moyens métrologiques utilisés (cf. page 23).

Les mesures effectuées sur ces radionucléides sont également transmises par les exploitants au RNM. Autour de certains sites, les analyses de tritium et de carbone 14 atmosphérique (et de krypton 85 autour de La Hague) permettent d'évaluer l'exposition de la population.

• Eaux de pluie

Le lessivage de l'atmosphère par les pluies provoque la précipitation sur le sol des radionucléides de l'atmosphère. La surveillance du compartiment atmosphérique est donc complétée par des prélèvements et analyses d'eau de pluie. Des collecteurs (cf. figure 4), relevés à une fréquence hebdomadaire ou mensuelle, récupèrent de façon continue les eaux issues des différents épisodes pluvieux.

FIGURE 4 / COLLECTEUR D'EAU DE PLUIE



© P. Demait

Des mesures de l'activité du tritium sont généralement réalisées sur l'eau de pluie. Dans le cadre de la surveillance des sites nucléaires, ces mesures sont souvent accompagnées de mesures de l'indice d'activité bêta global et alpha global (cf. note de bas de page, p.11), voire de mesures par spectrométrie gamma.

La surveillance du compartiment aquatique

• Eaux et matières en suspension

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. La surveillance des eaux (eaux douces, eaux de mer) est effectuée à l'aide de différents dispositifs de prélèvement et de mesure. Le dimensionnement de cette surveillance est propre à chaque site et dépend notamment des caractéristiques hydrogéologiques, du bruit de fond radiologique et de la présence éventuelle de radionucléides émis par le passé.

Implanté sur les 7 principaux fleuves en aval de toute installation nucléaire, le réseau Hydrotéléray (cf. figure 5) de l'IRSN a pour objet de déclencher une alarme en cas d'activités dans le milieu susceptibles de résulter d'un rejet accidentel de grande ampleur. 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. Les mesures réalisées permettent d'atteindre des seuils de décision d'environ 0,5 à 1 Bq/L pour le ¹³⁷Cs, le ⁶⁰Co et l'¹³¹I. Les données sont automatiquement analysées, stockées et retransmises au centre de contrôle du site IRSN du Vésinet.

FIGURE 5 / STATION HYDROTÉLÉRAY



© DR

La surveillance des eaux est aussi réalisée à partir d'hydrocollecteurs permettant des prélèvements semi-automatisés d'eau (cf. figure 6). Ces équipements réalisent des échantillonnages continus ou séquentiels. Les fréquences de prélèvement et de mesure varient selon les sites (journalières à mensuelles). Ce dispositif est parfois complété par un bac de décantation permettant de collecter les matières en suspension contenues dans ces eaux.

FIGURE 6 / HYDROCOLLECTEUR



De nombreux prélèvements ponctuels (instantanés) d'eau de surface sont enfin réalisés sur l'ensemble du territoire national par l'ensemble des acteurs à l'aide d'équipements principalement manuels (cf. figure 7). Ils complètent ainsi les prélèvements réalisés à l'aide des dispositifs semi-automatisés. Ainsi, EDF doit systématiquement effectuer un prélèvement dans le cours d'eau lors de chaque rejet liquide (prélèvement «mi-rejet») pour la mesure du tritium.

Les eaux de nappes souterraines font également l'objet d'une surveillance réglementaire de la part des exploitants via des prélèvements ponctuels. L'objectif est notamment de vérifier l'absence de rejets directs dans les nappes ou de suivre l'évolution d'une contamination ancienne par exemple. L'eau de nappe est pompée grâce à des ouvrages spécialement aménagés : les piézomètres. Les fréquences de prélèvement sont mensuelles à trimestrielles.

FIGURE 7 / ÉCHANTILLONNAGE PONCTUEL D'EAU À L'AIDE D'UN PRÉLEVEUR HORIZONTAL KEMMERER



Des mesures de tritium et des activités alpha et bêta globales sont généralement réalisées sur les prélèvements d'eau. Pour certains sites nucléaires, ces mesures sont complétées par une détermination des isotopes de l'uranium ou la recherche de radionucléides spécifiques (spectrométrie gamma, spectrométrie alpha...). Les gammes analytiques peuvent également être très étendues pour les mesures réalisées sur les eaux. À titre d'exemple, les seuils de décision pour le tritium varient entre 2,5 et 10 Bq/L pour la plupart des exploitants (le bruit de fond en tritium dans les eaux douces, hors influence, va de moins de 1 à 3 Bq/L). Dans le cadre de certains programmes d'expertise, des seuils inférieurs à 1 Bq/L peuvent être atteints grâce à la mise en œuvre d'autres techniques de prélèvement et de mesure. Les analyses de tritium effectuées dans de nombreux cours d'eau en aval d'installations nucléaires permettent de quantifier l'exposition potentielle de la population par ingestion.

Les seuils de décision relatifs à la mesure des eaux par spectrométrie gamma varient en France entre 0,0001 et 0,5 Bq/L selon les laboratoires et les objectifs recherchés.

• Sédiments

Les sédiments constituent un intégrateur sur le long terme pour les radionucléides peu solubles et de longue période. Des prélèvements ponctuels de sédiments sont ainsi réalisés en amont et en aval des installations nucléaires (cf. figure 8). Dans le cadre des programmes de surveillance, il s'agit principalement de sédiments de surface prélevés en vue d'obtenir des informations sur la présence éventuelle de radionucléides liée à des rejets récents.

La fréquence de ce type de prélèvement varie de mensuelle à quinquennale. Des mesures par spectrométrie gamma et des activités alpha et bêta globales sont principalement réalisées sur les sédiments. En fonction du spectre de rejets propre à chaque site, des mesures complémentaires (spectrométrie alpha, tritium, ^{14}C , ^{90}Sr) sont également effectuées avec des méthodes d'analyse permettant d'atteindre des performances analytiques conformes aux objectifs fixés (surveillance réglementaire, étude radioécologique...).

FIGURE 8 / PRÉLÈVEMENT PONCTUEL DE SÉDIMENTS RÉALISÉ À L'AIDE D'UN CÔNE DE BERTHOIS



© DR

• Faune et flore aquatiques

La surveillance du milieu aquatique est complétée par des campagnes de prélèvement portant sur des produits consommés par l'homme (poissons, crustacés, mollusques) et des bio-indicateurs (végétaux aquatiques) dans un objectif d'évaluation de l'impact des rejets des installations.

Les végétaux aquatiques peuvent accumuler les radionucléides avec des facteurs de concentration élevés. Ils réagissent rapidement aux variations de l'activité des radionucléides dans l'eau et sont considérés comme des indicateurs de type « sentinelle ». Les poissons prélevés sont sélectionnés en tenant compte de leur régime alimentaire et de leur mobilité. Les espèces herbivores et sédentaires sont ainsi privilégiées.

Les exigences réglementaires minimales imposent généralement un prélèvement annuel de poissons. Cependant, certains exploitants réalisent des études radioécologiques en complément de leur surveillance réglementaire. Les prélèvements réalisés dans le cadre de ces études ponctuelles ou à fréquence déterminée (annuelle, décennale) portent notamment sur les matrices environnementales sentinelles (algues, bryophytes et phanérogames aquatiques, poissons, mollusques).

L'IRSN et d'autres acteurs de la surveillance (ACRO...) réalisent également des campagnes mensuelles, trimestrielles, semestrielles ou annuelles de prélèvement de sédiments, de faune et de flore aquatiques sur un ensemble de stations dulçaquicoles et marines dans le cadre de la surveillance des installations nucléaires en particulier et du territoire national en général. À cette surveillance régulière s'ajoutent les résultats issus d'études radioécologiques réalisées périodiquement à l'échelle d'une ou plusieurs régions (constats radiologiques).

Dans le milieu aquatique continental, les prélèvements sont généralement réalisés en amont et en aval des sites nucléaires (cf. figure 9). Dans le milieu marin, les prélèvements sont réalisés en champ proche et en champ lointain des installations. L'implantation de ces stations marines tient compte de la localisation des sources potentielles de rejets et de leurs conditions de dispersion en mer (courantologie, marnage...).

Ces matrices font l'objet de mesures systématiques par spectrométrie gamma afin de rechercher la présence éventuelle de produits d'activation (^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , $^{110\text{m}}\text{Ag}$...) et de produit de fission (^{131}I , ^{129}I , ^{137}Cs , ^{106}Ru ...). Le spectre des radionucléides analysés dépend des rejets liquides de l'installation surveillée et de sa proximité avec d'autres installations situées en amont ou en champ proche. Certains acteurs de la surveillance centrent également leur stratégie sur l'analyse des

radionucléides qui contribuent majoritairement à l'impact dosimétrique (^{14}C et ^3H le plus souvent).

Des mesures complémentaires (^{90}Sr , Pu, Am, U) sont parfois effectuées autour de certains sites concernés par ces radionucléides, soit en raison de leurs rejets liquides actuels, soit à cause de marquages anciens. L'IRSN effectue par ailleurs un suivi de la rémanence des retombées issues des essais atmosphériques.

FIGURE 9 / ÉCHANTILLONNAGE DE VÉGÉTAUX AQUATIQUES (JUSSIE) DANS LA VIENNE EN AVAL DU CNPE DE CIVAUX



© DR

FIGURE 10 / PRÉLÈVEMENT D'UNE DENRÉE AGRICOLE



© DR

La surveillance du compartiment terrestre

• Les végétaux terrestres et les sols

En raison de leur efficacité à capter les aérosols ainsi que les poussières remises en suspension à partir du sol, les mousses, les lichens, les feuilles d'arbres et l'herbe sont utilisés comme bio-indicateurs de la contamination atmosphérique. Ils renseignent sur les changements à court terme et à long terme des concentrations en radionucléides dans l'environnement, ce que ne permettent pas nécessairement les mesures de denrées.

Pour les radionucléides de période radioactive suffisamment longue (quelques années), les sols constituent des intégrateurs des dépôts qui migrent progressivement en profondeur. La contribution d'une installation à l'activité présente dans un sol est souvent difficile à estimer en raison de la présence de radionucléides issus des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl (notamment le ^{137}Cs et le ^{90}Sr).

La majorité des sites nucléaires font l'objet de prélèvements d'herbe (fréquence mensuelle ou trimestrielle), ainsi que de sol de surface (fréquence annuelle). Les mesures réalisées sur ces échantillons varient en fonction des radionucléides présents dans les rejets des installations. Une spectrométrie gamma est quasi systématiquement réalisée. Cette mesure est ensuite complétée ponctuellement par des mesures de ^3H , de ^{14}C , de ^{90}Sr , de plutonium, d'américium et d'uranium. À cette surveillance régulière s'ajoute celle réalisée dans le cadre des réseaux de surveillance institutionnels (IRSN, DGCCRF). Des mesures complémentaires sur les végétaux terrestres (feuilles d'arbres, mousses) et les sols sont également obtenues dans le cadre d'études radioécologiques spécifiques, ponctuelles ou chroniques.



Analyse d'eau de la rade de Toulon

© DR

• Les denrées d'origine animale et végétale

Les feuilles des végétaux terrestres sont directement exposées aux phénomènes de dépôt des radionucléides (sous forme aérosol ou gaz). Elles présentent ainsi les activités les plus élevées. Seule une partie de l'activité déposée, plus ou moins faible suivant les radionucléides, est transférée des feuilles vers les autres organes de la plante (fruits, grains, racines ou tubercules).

Les animaux se contaminent essentiellement par ingestion de denrées contaminées. L'intensité des transferts vers les produits animaux (lait, viande et œuf) varie en fonction du produit et du radionucléide. Toutefois, les produits animaux présentent toujours des activités inférieures, voire très inférieures, à celles des végétaux.

Dans la majorité des programmes de surveillance (exploitants, institutionnels, associations), des analyses sur les denrées sont donc effectuées afin de conforter la surveillance effectuée sur les rejets et de contribuer à l'estimation des doses reçues par le public.

Les principales denrées prélevées par les exploitants nucléaires sont le lait (cf. figure 11) et les céréales. Les denrées prélevées (céréales, champignons, fruits, légumes, viandes, miel, œuf, cidre, vin, huile d'olive...), les fréquences d'échantillonnage et les types d'analyse sont très variables en fonction des exploitants et de la localisation des sites.

Une veille régulière des denrées est réalisée par l'IRSN à l'échelle départementale. Un réseau de préleveurs de productions végétales (céréales, légumes, fruits, champignons...) et animales (lait, viande, gibiers, poissons) a été déployé sur l'ensemble du territoire avec la contribution des services déconcentrés de la DGAL, de la DGCCRF et de France Agrimer. Enfin, l'état radiologique des zones non influencées par les rejets d'installations nucléaires est également établi à partir de mesures de très bas niveau réalisées lors d'études spécifiques ou de constats radiologiques.

Les mesures réalisées sont comparables à celles effectuées sur les végétaux terrestres [spectrométrie gamma sur tous les échantillons, puis ponctuellement pour les exploitants ou plus systématiquement pour les institutionnels des mesures de ^3H , de ^{14}C , de ^{90}Sr , de plutonium, d'américium et d'uranium]. Comme pour l'ensemble des échantillons prélevés dans le cadre de la surveillance radiologique de l'environnement, les performances métrologiques recherchées sont adaptées aux objectifs fixés (surveillance régulière d'une installation, étude radioécologique...) et peuvent aboutir à des seuils de décision variant parfois d'un facteur 10 à 100 en fonction des types de mesure.

FIGURE 11 / ÉCHANTILLONNAGE DE LAIT DE VACHE



© P. Bourguignon/Andra

FOCUS **LES ÉTUDES** **RADIOÉCOLOGIQUES**

Certains exploitants comme EDF réalisent des études radioécologiques complémentaires ponctuelles ou à fréquence déterminée (annuelle complétée par des analyses décennales spécifiques).

Mises en œuvre depuis 1992 sur l'ensemble des CNPE par EDF de manière volontaire, en complément des analyses réalisées dans le cadre de la réglementation, des études annuelles permettent d'acquérir une connaissance en permanence actualisée des niveaux de radioactivité naturelle et artificielle de l'environnement autour des CNPE afin de déterminer dans quelle mesure l'exploitation de ces installations contribue à l'apport de radionucléides artificiels dans le milieu récepteur.

Les objectifs sont notamment :

- de suivre l'évolution dans le temps des niveaux de radioactivité de l'environnement et les corrélés avec les éventuels événements survenus sur un site au cours de l'année précédente pour le bilan annuel ou de la décennie passée dans le cas des compléments radioécologiques décennaux ;
- d'identifier et de comprendre les mécanismes de transfert des radionucléides artificiels dans l'environnement, fournissant autant de données utiles et valorisées dans le cadre des études d'impact mais aussi le cas échéant pour mieux communiquer avec le public.

Les prélèvements et analyses portent sur :

- des matrices environnementales sentinelles qui facilitent l'identification des éléments traces (bio-indicateurs). Les temps de réaction et la capacité d'intégration variables des différentes matrices sont pris en compte pour les prélèvements. Des bryophytes, des mollusques, des sols et sédiments sont ainsi prélevés ;
- des vecteurs directs de la radioactivité comme par exemple les eaux superficielles, les eaux souterraines ;
- des matrices environnementales consommées par les animaux ou l'homme comme par exemple des herbes, des céréales, des productions maraîchères, le lait, des poissons, des produits alimentaires transformés.

Le suivi radioécologique annuel permet de suivre l'évolution de bio-indicateurs à cycle rapide, prélevés toujours à la même place afin de mesurer les variations et de les corrélés aux termes sources (rejets radioactifs liquides et atmosphériques des CNPE). Ce suivi est essentiellement constitué de prélèvements et analyses (spectrométrie gamma, bêta global et éventuellement le tritium (HTO) et carbone 14) demandés dans les arrêtés d'autorisation de rejets propres à chaque installation auxquels l'exploitant ajoute de manière volontaire des analyses spécifiques pour améliorer encore la connaissance de son impact environnemental.

Les mesures réalisées dans le cadre de ces suivis radioécologiques, obtenues dans un contexte non-réglementaire, ne sont actuellement pas transmises au Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM). Elles ont cependant été mises à la disposition de l'IRSN par EDF afin d'être intégrées à l'ensemble des données disponibles et exploitées pour la réalisation du bilan radiologique 2011-2014.

Synthèse des critères stratégiques et des dispositifs de prélèvement et de mesure associés à la surveillance radiologique des différents compartiments de l'environnement

Les tableaux ci-après synthétisent les différentes méthodes de surveillance des compartiments atmosphériques, aquatiques et terrestre ainsi que les critères stratégiques associés aux échantillons prélevés ou aux mesures *in situ* réalisées.

TABLEAU 1 / COMPARTIMENT ATMOSPHÉRIQUE

Compartiment atmosphérique	Critères stratégiques associés à la mesure et à l'échantillonnage dans ce compartiment	Dispositifs de prélèvement et/ou de mesure
Air	Milieu récepteur des rejets atmosphériques. Les particules et les gaz radioactifs présents dans l'air délivrent une dose à l'homme par exposition externe et interne (inhalation).	Sondes de mesure en continu (débit de dose gamma ambiant)
Aérosols atmosphériques		Dosimètres passifs environnementaux
		Balises de prélèvement et de mesure en continu d'aérosols
Gaz		Dispositifs de prélèvement en continu d'aérosols (et mesure différée en laboratoire)
Eau de pluie	Dépôt humide des aérosols (et donc potentiellement de la radioactivité) par lessivage de la colonne d'air traversée par les gouttes d'eau de pluie	Barboteurs (³ H, ¹⁴ C), moniteurs de gaz rares (⁸⁵ Kr), cartouche à charbon actif (iodes)
		Collecteurs d'eau de pluie

TABLEAU 2 / COMPARTIMENT TERRESTRE INCLUANT LES DENRÉES

Compartiment terrestre et denrées	Critères stratégiques associés à la mesure et à l'échantillonnage dans ce compartiment	Dispositifs de prélèvement et/ou de mesure
Végétaux terrestres (herbes, feuilles d'arbres, mousses...)	En raison de leur efficacité à capter les aérosols ainsi que les poussières remises en suspension à partir du sol, les mousses, les lichens, les feuilles d'arbre et l'herbe sont utilisés comme bio-indicateurs de la contamination atmosphérique.	Prélèvements ponctuels (manuels)
Sols	Pour les radionucléides de période radioactive suffisamment longue (quelques années), les sols constituent des intégrateurs des dépôts qui migrent progressivement en profondeur. Les sols sont également responsables, par voie racinaire, de la contamination des légumes, des fruits ou des graminées.	<ul style="list-style-type: none"> • Prélèvements ponctuels (manuels) • Spectrométrie gamma <i>in situ</i>
Productions végétales (céréales, légumes, fruits, vin...)	Contamination par dépôt sur les parties aériennes ou par absorption racinaire. Risque de contamination interne après consommation.	Prélèvements ponctuels (manuels, collecte chez les producteurs)
Productions animales (lait, viande, œufs...)	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...).	Prélèvements ponctuels (manuels, collecte directe chez les producteurs, dans les abattoirs...)

TABLEAU 3 / COMPARTIMENT AQUATIQUE

Compartiment aquatique	Critères stratégiques associés à la mesure et à l'échantillonnage dans ce compartiment	Dispositifs de prélèvement et/ou de mesure
Eaux	Milieu récepteur des rejets liquides des installations et des apports éventuels par les eaux de ruissellement, l'eau est le vecteur direct de la contamination des composants du milieu aquatique.	<ul style="list-style-type: none"> Dispositifs de prélèvement et de mesure en continu (balise Hydrotéléray de l'IRSN) Hydrocollecteurs Prélèvements ponctuels
Matières en suspension	Les MES sont des supports privilégiés des radionucléides. Leur mobilité contribue à la contamination des berges, des plages ou des terres après des épisodes de crues.	<ul style="list-style-type: none"> Bacs de décantation associés aux hydrocollecteurs Filtration en laboratoire des eaux prélevées
Sédiments	Les sédiments sont de bons intégrateurs de radionucléides et constituent un réservoir de contamination du milieu aquatique par des phénomènes de désorption.	Prélèvements ponctuels (manuels ou mécaniques)
Végétaux aquatiques (algues, mousses, phanérogames)	Les végétaux aquatiques ont une grande capacité à fixer rapidement certains radionucléides. Leur large répartition géographique permet de comparer les activités massiques en radionucléides en différents lieux. Certains végétaux comme les algues marines réagissent rapidement à des variations de la teneur en radionucléides de l'eau.	Prélèvements ponctuels (manuels)
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.	Prélèvements ponctuels (manuels ou collecte directe chez les producteurs)
Crustacés Poissons	Leur position en fin de chaîne alimentaire en fait de bons intégrateurs des radionucléides. Ils sont, par ailleurs, largement consommés par les populations. La répartition géographique des espèces prélevées permet également de comparer les activités massiques mesurées sur les différents points de prélèvements du territoire.	Prélèvements ponctuels (pêches ou collecte directe chez les professionnels)



Salle des détecteurs de spectrométrie gamma de l'IRSN à Orsay permettant des mesures de très bas niveaux d'activité

1.3. DU PLAN DE PRÉLÈVEMENT AUX RÉSULTATS DE MESURE

Toutes les techniques d'analyse et de prélèvement présentées ci-après sont effectuées par les contributeurs au RNM suivant des normes NF ou ISO, qui les décrivent, notamment la norme ISO 17025.

- **Plans de prélèvement et d'analyse**

La surveillance réglementaire de l'environnement des installations nucléaires de base est adaptée à chaque type d'installation (centre nucléaire de production d'électricité, usine, laboratoire). Les analyses réalisées sur chaque échantillon suivent des plans prédéfinis élaborés en fonction des rejets (type de rejet, radionucléides et activités rejetées) et de son historique événementiel (incidents et rejets passés). Dans le chapitre 3, les plans de prélèvement et d'analyses sont fournis pour chaque site après présentation des rejets.

- **Préparation des échantillons**

Dès réception au laboratoire, les prélèvements sont traités et conditionnés en fonction des analyses radiologiques auxquelles ils vont être soumis. La mesure de la radioactivité sur un

échantillon prélevé dans l'environnement débute par sa préparation. Celle-ci va du simple conditionnement en récipient de forme normalisée à une préparation plus élaborée comme le séchage, la calcination ou la lyophilisation qui permettent de concentrer l'échantillon (cf. figure 12). D'une manière générale, les différentes techniques de traitement des échantillons visent à concentrer un maximum de radioactivité dans un minimum de volume afin de pouvoir détecter la présence de radionucléides à bas voire très bas niveaux. Dans certains cas, la concentration de l'échantillon débute dès son prélèvement grâce aux dispositifs spécifiques mis en œuvre (exemples : prélèvement des aérosols, des matières en suspension...).

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. La plupart des acteurs de la surveillance effectuent également l'archivage d'une partie des échantillons analysés (filtres, sols et sédiments séchés, échantillons de faune et flore séchés ou calcinés), en vue d'une éventuelle analyse ultérieure par des moyens complémentaires ou plus performants.



Spectrométrie alpha

© A. Chézère/CEA

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

• **Analyses radiologiques**

Déterminer l'activité d'un radionucléide (cf. chapitre 4) dans un échantillon consiste à estimer la quantité de rayonnement qu'il émet, et ceci par la mesure du rayonnement reçu par un détecteur. Les principales méthodes de détection sont fondées sur le fait qu'un rayonnement crée, au sein de la matière qui les reçoit, des ionisations (arrachements d'électrons aux atomes) et des excitations (transmission d'une quantité d'énergie aux atomes). Ces traces temporaires laissées par le rayonnement dans le détecteur sont amplifiées de manière à être comptées. La prise en compte du rendement du dispositif de mesure permet ensuite de relier le nombre d'impulsions par seconde (ou « coups par seconde ») reçues par le détecteur, au rayonnement émis par l'échantillon et donc à son activité. Du fait notamment des différences importantes dans la distance que peuvent parcourir les différents types de rayonnement (cf. chapitre 4), il existe plusieurs dispositifs et méthodes de mesures :

- la spectrométrie gamma permet d'identifier les radionucléides et de mesurer leur activité pour la plupart des radionucléides émetteurs gamma, dans des échantillons frais, séchés ou incinérés (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co , ^{125}Sb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{131}I , ^{129}I , ^{40}K , ^{210}Pb ...);
- en raison du parcours très faible des rayonnements alpha et leur absorption dans l'échantillon même (diminuant ainsi le rayonnement sortant de l'échantillon qui peut être mesuré), la mesure des radionucléides émetteurs alpha (plutonium, uranium, polonium...) par spectrométrie alpha notamment, nécessite un traitement radiochimique préalable au comptage. Il s'agit d'extraire les atomes radioactifs considérés de l'ensemble de l'échantillon en éliminant tout ou partie de la matière de l'échantillon qui les entoure ;

- la radiochimie est également un préalable à la mesure de certains émetteurs bêta comme le strontium 90 ;
- enfin, pour les radionucléides émettant des particules bêta très peu énergétiques comme le tritium ou le carbone 14, l'échantillon est mis en solution de manière à être directement mélangé au liquide scintillant qui permettra leur détection.

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.

• **Expression des résultats de mesure, seuil de décision et incertitudes**

Même en l'absence de radioactivité dans l'échantillon à mesurer, les dispositifs de mesure radiologiques fournissent un résultat de mesure qui est lié aux rayonnements extérieurs, notamment aux rayonnements naturels (cf. chapitre 2), auxquels est exposé le détecteur, ainsi qu'à un bruitage intrinsèque au dispositif même. Ce « bruit de fond métrologique » est fluctuant. Aussi, lorsque l'activité de l'échantillon est très faible, il est difficile de distinguer le rayonnement ajouté issu de l'échantillon, de la fluctuation du bruit de fond métrologique. Dans certains cas, le métrologiste « décide » que le résultat de la mesure de l'activité de l'échantillon n'est pas significatif (que l'activité mesurée ne peut pas être clairement attribuable à l'échantillon). Le métrologiste déclare alors l'activité de l'échantillon « inférieure au seuil de décision » : $\leq \text{SD}$. Le seuil de décision est donc la valeur minimale que doit avoir la mesure d'un échantillon pour que le métrologiste puisse décider de la présence d'une activité. À noter que la valeur de ce seuil de décision ne dépend que du dispositif de mesure (du bruit de fond métrologique) et non de l'activité de l'échantillon.

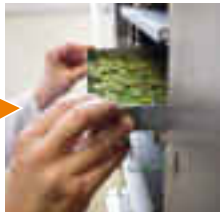
FIGURE 12 / PRINCIPALES ÉTAPES DE LA MESURE DE LA RADIOACTIVITÉ DANS DES ÉCHANTILLONS ENVIRONNEMENTAUX (DU PRÉLÈVEMENT À L'ARCHIVAGE)



1. Prélèvement d'un échantillon d'herbe



2. Séchage à l'étuve



3. Lyophilisation



4. Broyage et homogénéisation



5. Calcination



6. Radiochimie



7-1. Détection des rayonnements alpha



7.2. Détection des rayonnements bêta



7.3. Détection des rayonnements gamma



8. Archivage

Une fois le prélèvement réalisé sur le terrain **(1)**, celui-ci doit être rapidement conditionné afin d'éviter toute dégradation, puis transporté au laboratoire pour y subir différents traitements. Dès son arrivée, les caractéristiques de l'échantillon sont enregistrées afin de garantir la traçabilité tout au long du processus.

La mesure de la radioactivité sur un échantillon débute par sa préparation physique. Celle-ci va du simple conditionnement dans un récipient normalisé à une préparation plus élaborée comme le séchage à l'étuve **(2)**, la lyophilisation **(3)**, le broyage **(4)** et la calcination **(5)** qui permettent de concentrer la radioactivité contenue dans l'échantillon.

La nécessité de concentrer l'échantillon ou d'extraire les radionucléides à mesurer implique parfois la mise en œuvre de traitements poussés **(6)** aboutissant généralement à la concentration ou à la séparation des radionucléides recherchés.

À l'issue de cette phase, les échantillons sont mesurés sous différents types de compteurs en fonction des radionucléides recherchés **(7)** (compteurs proportionnels alpha-bêta, compteurs alpha à photomultiplicateurs, compteurs à scintillation liquide, détecteurs gammas...). Ils sont ensuite archivés **(8)**.

En raison notamment de la fluctuation du bruit de fond métrologique, il n'existe pas de mesure exacte d'une activité. Le résultat de mesure est toujours assorti d'une incertitude métrologique fournie par le métrologiste. Cette incertitude métrologique est cependant très faible au regard de celle liée à la représentativité de l'échantillon vis-à-vis de la composante de l'environnement échantillonnée et qui est beaucoup plus difficile à estimer. Quelle est en effet la représentativité d'un litre d'eau prélevé

ponctuellement à un endroit précis d'une rivière au regard de l'eau de cette rivière au cours de la journée ou de la semaine ? Quelle est la représentativité de l'activité d'une salade prélevée à un endroit donné au regard de l'activité moyenne des salades de tout le champ ? C'est pourquoi, afin de ne pas donner un sentiment illusoire de précision, les incertitudes fournies par le métrologiste ne sont pas reportées dans les graphiques et tableaux de ce présent rapport.

1.4. LE RÉSEAU NATIONAL DE MESURES DE LA RADIOACTIVITÉ DE L'ENVIRONNEMENT (RNM)

• Centraliser les informations

Centraliser les informations sur la radioactivité de l'environnement en France, garantir la transparence de l'information tout en facilitant sa compréhension pour tous les publics et en renforçant l'harmonisation et la qualité des mesures effectuées par les laboratoires, tels sont les enjeux du Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM).

Contexte et objectifs

Les acteurs de la mesure de la radioactivité de l'environnement sont nombreux dans le paysage nucléaire français. En fonction de ses missions ou de ses obligations réglementaires, chaque acteur se positionne dans un contexte particulier et y répond par une stratégie de surveillance qui lui est propre. Des milliers de résultats sont donc disponibles en France, qu'ils proviennent de l'IRSN, des exploitants d'installations nucléaires ou d'autres acteurs publics, privés ou associatifs. Cependant, malgré les efforts entrepris ces dernières années en matière d'information et de transparence dans ce domaine, la multiplicité des acteurs et des sources d'information rend difficile l'appropriation des résultats et la compréhension du rôle de chacun par le public. La question de la qualité des informations est également essentielle, notamment dans un contexte aussi sensible que celui de la radioactivité dans l'environnement, mais également dans un domaine aussi complexe que celui de la métrologie nucléaire. Il est donc primordial de s'assurer au préalable des compétences techniques et organisationnelles des laboratoires.

Dans le cadre de la retranscription en droit français de la directive 96/29, le code de la santé publique (notamment les articles R. 1333-11 et R. 1333-11-1), modifié par le décret n° 2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants, institue le RNM. Les modalités de fonctionnement du RNM, initialement fixées

par arrêté ministériel (17 octobre 2003 puis 27 juin 2005), ont été remplacées par des décisions homologuées de l'ASN en 2008 (n° 2008-DC-0099 du 29 avril 2008 et n° 2015-DC-0500 du 26 février 2015) pour tenir compte des évolutions réglementaires et en particulier de la publication de la loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière de nucléaire (loi TSN), désormais codifiée dans le code de l'environnement.

• La mise en place du RNM répond à deux objectifs majeurs :

- assurer la transparence des informations sur la radioactivité de l'environnement en mettant à disposition du public les résultats de la surveillance de la radioactivité dans l'environnement en France ;
- poursuivre le développement d'une politique qualité pour les mesures de radioactivité dans l'environnement, par l'instauration d'un agrément des laboratoires, délivré par décision de l'Autorité de sûreté nucléaire.

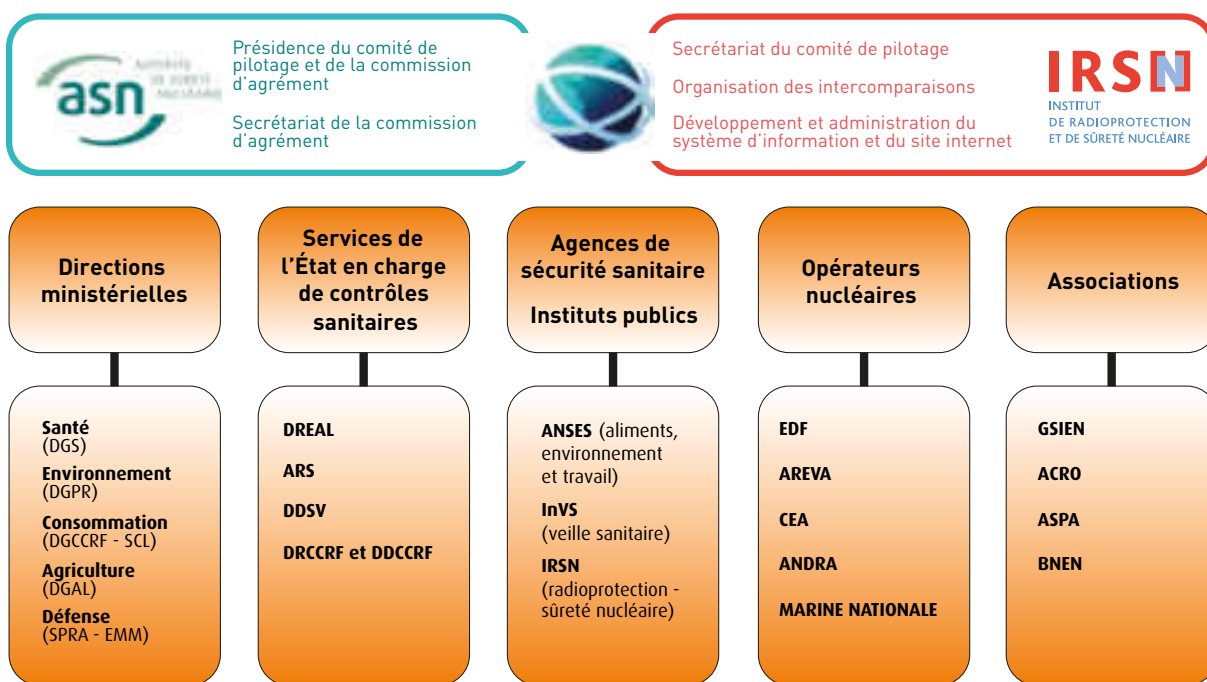
Le Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement a pour mission de contribuer à l'estimation des doses dues aux rayonnements ionisants auxquels la population est exposée et à l'information du public. Pour atteindre cet objectif, le RNM rassemble et met à la disposition du public :

- des résultats de mesures de la radioactivité de l'environnement ;
- des documents de synthèse sur la situation radiologique du territoire et sur l'évaluation des doses dues aux rayonnements ionisants auxquels la population est exposée.

• Organisation et fonctionnement du RNM

Le RNM est développé sous l'égide de l'ASN en collaboration avec l'IRSN (cf. figure 9) et en partenariat avec les principaux acteurs du RNM dont les ministères chargés de l'Environnement (DGPR), de la Consommation (DGCCRF), de la Santé (DGS, ARS), de la Défense (SPRA, Marine nationale), et de l'Agriculture (DGAL), les agences de sécurité sanitaire (InVS, Anses), les principaux opérateurs nucléaires (EDF, Areva, CEA, Andra) et les associations de protection de l'environnement et des consommateurs (Acro, GSIEN, ANCCLI).

FIGURE 9 / ACTEURS DES INSTANCES DU RNM ET PRINCIPAUX ACTEURS DE LA MESURE DE LA RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT EN FRANCE



* Différents représentants, issus d'autres organismes ou non, sont également nommés en qualité de personnes qualifiées

Le RNM est animé par deux instances placées sous la présidence de l'ASN. Il s'agit d'une part du comité de pilotage chargé de définir les orientations stratégiques du réseau, et d'autre part de la commission d'agrément chargée d'émettre un avis sur les demandes d'agrément déposées par les laboratoires. La figure 9 illustre schématiquement les rôles de l'IRSN et de l'ASN, ainsi que les principaux acteurs des instances du réseau national et les principaux acteurs de la mesure de la radioactivité dans l'environnement.

Le comité de pilotage donne son avis sur les orientations du réseau national proposées par l'ASN. Il veille à rendre publiques les données relatives à la radioactivité prévues par l'article R1333-11 du code de la santé publique. Il est également amené à émettre des avis sur les rapports de synthèse portant sur l'état radiologique de l'environnement et sur l'impact des installations nucléaires, qu'ils soient émis par l'IRSN ou par tout autre organisme qui lui en ferait la demande.

Qui transmet les mesures de radioactivité de 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 RNM sont ceux obtenus :

- 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 site Internet du RNM ;
- 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 ;
- 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 RNM est demandée par l'organisme détenteur de ces résultats.

Essais interlaboratoires et agréments délivrés par l'ASN

Les agréments relatifs aux mesures de radioactivité de l'environnement s'adressent à tous les laboratoires (publics, privés, universitaires, associatifs) mais concernent directement ceux qui effectuent des mesures en vertu de dispositions législatives ou réglementaires et qui ont obligation à transmettre leurs mesures au RNM. Outre un dossier complet démontrant la conformité normative et réglementaire de leur organisation et de leurs pratiques, les laboratoires doivent participer aux essais interlaboratoires organisés par l'IRSN qui ont pour but d'éprouver la compétence technique de laboratoires (*cf.* figure 10).

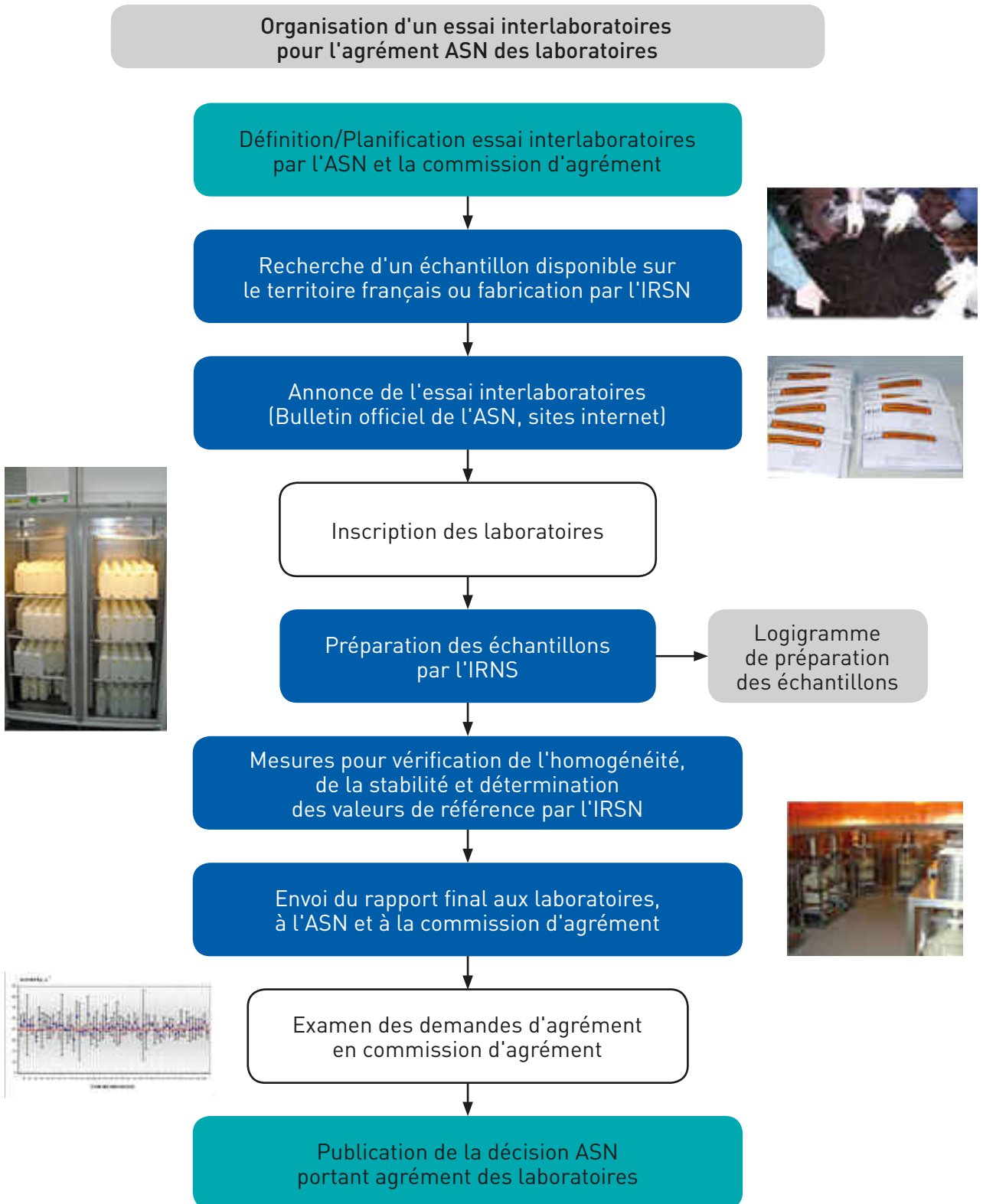
Il s'agit généralement de tests d'aptitude qui consistent à comparer les résultats obtenus par les laboratoires sur des échantillons identiques à une valeur assignée (valeur de référence définie par l'IRSN). Les essais organisés par l'IRSN concernent la mesure de radionucléides émetteurs bêta et gamma, émetteurs bêta purs et émetteurs alpha artificiels, ainsi que les radionucléides des chaînes naturelles de l'uranium, du thorium et du radium et de l'uranium pondéral, soit plus de 43 types d'essais différents.

Pour ces essais, l'IRSN est chargé, soit par l'ASN au travers des décisions n° 2008-DC-0099 de l'ASN du 29 avril 2008 et n° 2015-DC-0500 du 26 février 2015, soit par la DGAL en tant que laboratoire national de référence « radionucléides » (LNR RN) par référence à l'arrêté du 29 décembre 2009, de la préparation des échantillons, de leur livraison aux laboratoires inscrits aux tests, de la détermination des valeurs assignées et de l'exploitation statistique des résultats obtenus par les laboratoires.

Les échantillons préparés par l'IRSN sont distribués simultanément aux participants pour être mesurés en parallèle. Le lot d'échantillons fourni doit être suffisamment homogène et stable en termes de radioactivité contenue afin qu'aucun écart de résultat ne puisse être attribué à un défaut d'homogénéité ou de stabilité.

Pour chaque essai, le nombre de participants est compris entre 15 et 70 dont quelques laboratoires étrangers. L'IRSN organise ce type d'essai depuis 40 ans avec actuellement un rythme annuel de six à sept essais. Depuis 2006, l'IRSN est accrédité par le Comité français d'accréditation (Cofrac) pour cette activité particulière d'organisation des essais interlaboratoires. Ces essais permettent principalement aux laboratoires participants d'obtenir ou de renouveler leur agrément de l'ASN ou de la DGAL dans le cadre de la réglementation, mais également de s'assurer de la qualité des méthodes d'analyses mises en œuvre et de fournir aux organismes d'accréditation les éléments permettant de juger de la maîtrise des processus d'analyses.

FIGURE 10 / SCHEMA D'ORGANISATION D'UN ESSAI INTERLABORATOIRES POUR L'AGREMENT ASN DES LABORATOIRES



L'agrément des laboratoires de mesures de la radioactivité de l'environnement

L'agrément des laboratoires est délivré par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Les modalités d'agrément des laboratoires sont définies dans la décision homologuée n° 2008-DC-0099 du 29 avril 2008 de l'ASN, modifiée par la décision n° 2015-DC-0500 du 26 février 2015. L'agrément délivré porte non seulement sur les mesures effectuées en laboratoire mais aussi sur les dispositions liées aux modalités de prélèvement des échantillons dans l'environnement.

Chaque catégorie de mesure, couplant un type de mesure (radionucléides artificiels ou naturels, émetteurs gamma, bêta ou alpha ainsi que la dosimétrie gamma ambiante) et un compartiment de l'environnement (eaux, sols, produits biologiques (végétaux, poissons, lait...) fait l'objet d'un agrément spécifique. L'ASN délivre ainsi 43 types d'agrément distincts.

Le domaine de réalisation des essais d'intercomparaison des laboratoires est celui des faibles niveaux d'activité même si, dans l'environnement, les activités des radionucléides artificiels sont rarement supérieures aux seuils de décision des méthodes de mesure les plus sensibles. Aussi, l'aptitude des laboratoires est testée sur des échantillons rechargés en laboratoire pour atteindre des niveaux d'activité de l'ordre de 0,5 à 10 Bq/kg pour les radionucléides émetteurs gamma artificiels (^{60}Co , ^{137}Cs ...) et de l'ordre de 0,05 à 1 Bq/kg pour les radionucléides émetteurs alpha (Pu, Am). En revanche, les activités des radionucléides des chaînes de l'uranium et du thorium dans l'environnement étant naturellement plus élevées (voisines ou supérieures à 50 Bq/kg de sol), les tests d'aptitude se font généralement sur des échantillons directement prélevés dans l'environnement.

L'agrément s'adresse à tout laboratoire français ou étranger, quels que soient son statut, sa taille, son secteur d'activité, qu'il exerce son activité sur un périmètre défini (site industriel) ou non défini (prestations de service), qui souhaite faire reconnaître sa compétence en la matière dans le cadre du RNM. Il concerne en priorité les laboratoires de surveillance de l'environnement qui effectuent des mesures en vertu de dispositions réglementaires ou législatives et qui, de ce fait, ont obligation depuis le 1^{er} janvier 2009 d'être agréés pour transmettre leurs mesures au RNM (Andra, Areva, CEA, EDF, Institut Max Von

Laue-Paul Langevin, Marine nationale...). Mais il s'adresse également à tout laboratoire public ou privé, universitaire ou associatif qui procède à des contrôles de la radioactivité dans l'environnement pour le compte de services publics ou de collectivités territoriales ou pour son propre compte.

Pour obtenir un agrément, le laboratoire doit adresser à l'ASN un dossier démontrant la conformité de son organisation et de ses pratiques avec la norme ISO/CEI 17025 fixant les exigences générales applicables aux laboratoires. Ce dossier est complété par une demande des agréments sollicités, à laquelle sont annexés les résultats du laboratoire aux essais de comparaison interlaboratoires (EIL) organisés par l'IRSN.

L'agrément est délivré pour une durée maximale de cinq ans sur proposition d'une commission d'agrément multipartite qui fonde ses avis tant sur les résultats du laboratoire aux EIL que sur le dossier de demande d'agrément déposé par le laboratoire.

Les décisions relatives aux agréments sont publiées sur le site Internet de l'ASN (www.asn.fr), ainsi que la liste des laboratoires agréés, actualisée deux fois par an.

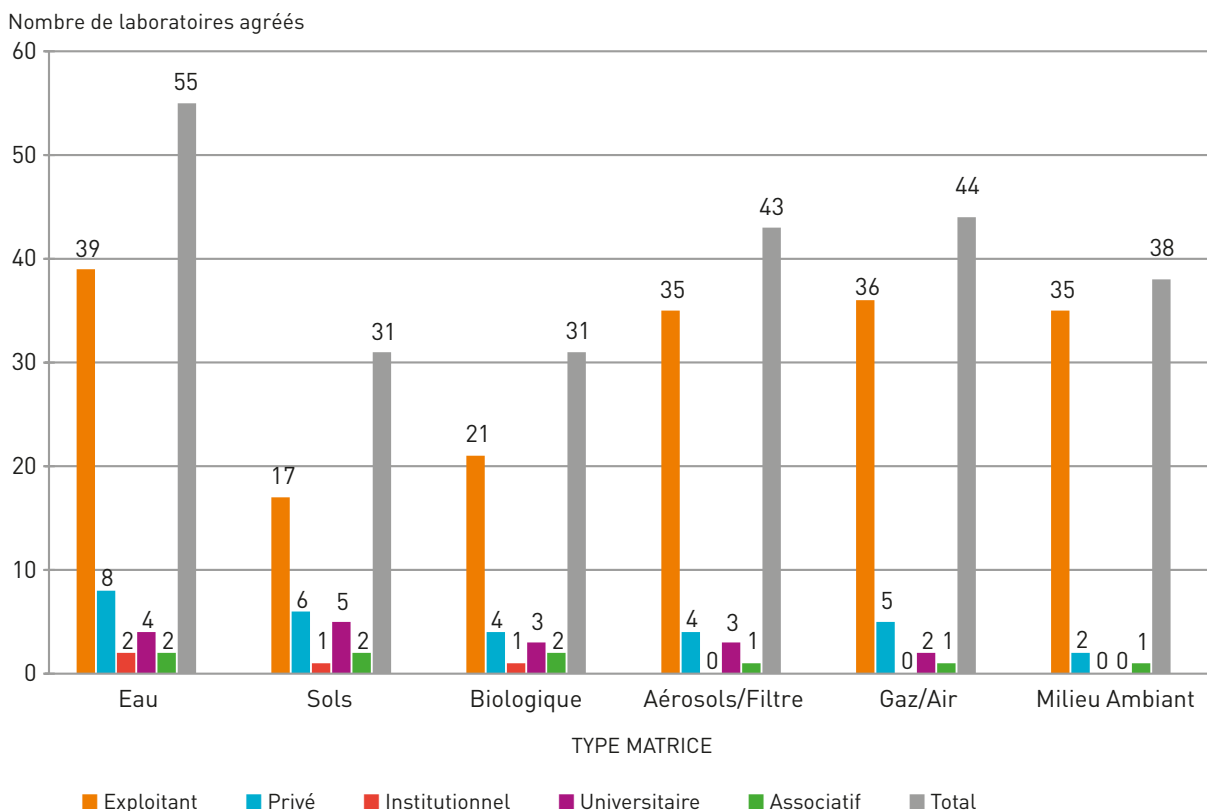
• État des laboratoires agréés au 1^{er} janvier 2015

Au 1^{er} janvier 2015, le nombre de laboratoires agréés est de 61 dont 42 laboratoires d'exploitants nucléaires, les autres se répartissant entre les secteurs privé (8), universitaire (5), institutionnel (2) et associatif (2). Ces laboratoires disposent de 826 agréments couvrant les 43 catégories d'agrément.

C'est dans le domaine de la surveillance de la radioactivité des eaux que les laboratoires agréés sont les plus nombreux avec 55 laboratoires ayant jusqu'à 13 agréments différents pour la surveillance de ce milieu (cf. figure 11).

Une quarantaine de laboratoires disposent d'agrément pour les mesures de matrices biologiques (chaîne alimentaire), des poussières atmosphériques, de l'air ou encore de la dosimétrie gamma ambiante. Dans les sols, le nombre de laboratoires s'établit autour de 30. Si la plupart des laboratoires sont compétents pour la mesure des émetteurs gamma dans toutes les matrices environnementales, seule une dizaine d'entre eux est agréée pour les mesures du carbone 14, des transuraniens ou des radionucléides des chaînes naturelles de l'uranium et du thorium dans les matrices eau, sol et biologiques.

FIGURE 11 / RÉPARTITION AU 1^{ER} JANVIER 2015 DES AGRÈMENTS SELON LE COMPARTIMENT DE L'ENVIRONNEMENT ET LE STATUT DU LABORATOIRE



• **Bilan global du processus d'agrément des laboratoires**

La procédure d'agrément des laboratoires de radioactivité de l'environnement, en vigueur depuis 2003, constitue un moteur d'amélioration continue des pratiques des laboratoires, tant au niveau des prélèvements d'échantillons qu'au niveau des mesures de radioactivité. Ces améliorations, dues notamment à la mise en œuvre de méthodes normalisées, sont notables dans le domaine des prélèvements mais également dans le domaine des mesures. Ainsi, l'exploitation du retour d'expérience de huit années d'essais de comparaison interlaboratoires montre, d'un cycle d'essais à l'autre, un meilleur centrage des valeurs transmises par les laboratoires autour de la valeur de référence fournie par l'IRSN qui se traduit par un écart-type interlaboratoires généralement plus faible entre les essais du 1^{er} et du 2^e cycle d'agrément (respectivement 2003-2008 et 2008-2012).

Maintenir la qualité des données fournies par les laboratoires agréés de mesures de radioactivité de l'environnement, l'améliorer encore, inciter les laboratoires agréés à étendre leur domaine de compétence et permettre à de nouveaux laboratoires de s'engager dans la démarche d'agrément pour assurer la pluralité des sources d'informations, tels sont les enjeux du régime d'agrément des laboratoires par l'ASN, destiné à conforter la confiance du public dans les mesures de l'état radiologique de l'environnement diffusées sur le site Internet du RNM.

TABLEAU 4 / GRILLE DES AGRÈMENTS ET PLANNING DES ESSAIS D'INTERCOMPARAISON 2015-2019

Code	Catégorie de mesures radioactives	Type 1		Type 2		Type 3		Type 4		Type 5		Type 6	
		Eau de mer	Eaux	Matrices sols	Matrices biologiques	Aérosols sur filtre	Gaz air	Milieu ambiant (sol/air)					
..-01	Radionucléides émetteurs $\gamma > 100$ keV		1_01	2_01	3_01	4_01	5_01						-
..-02	Radionucléides émetteurs $\gamma < 100$ keV		1_02	2_02	3_02	4_02	5_02						-
..-03	Alpha global		1_03	2_03	-	4_03	-						-
..-04	Bêta global		1_04	2_04	-	4_04	-						-
..-05	H-3		1_05	2_05	3_05	-	-			Cf eau			-
..-06	C-14		1_06	2_06	3_06	-	-			Cf eau/ Na OH			-
..-07	Sr-90/ γ -90		1_07	2_07	3_07	4_07	-			-			-
..-08	Autres émetteurs bêta purs (Ni-63...)		1_08	⁹⁹ Tc 2_08	⁹⁹ Tc 3_08	-	-			-			-
..-09	Isotopes U		1_09	2_09	3_09	4_09	-			-			-
..-10	Isotopes Th		1_10	2_10	3_10	4_10	-			-			-
..-11	Ra-226 + desc.		1_11	2_11	3_11	-	-			Rn 222 : 5_11			-
..-12	Ra-228 + desc.		1_12	2_12	3_12	-	-			Rn 220 : 5_12			-
..-13	Isotopes Pu, Am, (Cm, Np)		1_13	2_13	3_13	4_13	-			-			-
..-14	Gaz halogénés		-	-	-	-	5_14			-			-
..-15	Gaz rares		-	-	-	-	⁸⁵ Kr 5_15			-			-
..-16	Dosimétrie gamma		-	-	-	-	-			-		6_16	-
..-17	Uranium pondéral		1_17	2_17	3_17	4_17	-			-			-

■ 1^{er} semestre 2015
 ■ 1^{er} semestre 2016
 ■ 1^{er} semestre 2017
 ■ 1^{er} semestre 2018
 ■ 1^{er} semestre 2019
■ 2nd semestre 2015
 ■ 2nd semestre 2016
 ■ 2nd semestre 2017
 ■ 2nd semestre 2018
 ■ 2nd semestre 2019

Le système d'information du Réseau national et son site Internet

Conformément à l'article 4 de la décision homologuée n° 2008-DC-0099 de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) modifiée par la décision n° 2015-DC-0500 du 26 février 2015, l'IRSN est en charge de la gestion du RNM. À ce titre, l'Institut doit assurer :

- la centralisation des données de mesure de la radioactivité de l'environnement transmises en application de l'article II de l'article R1333-11 ;
- l'exploitation de ces données ;
- la transmission de ces données à l'ASN et à l'Institut national de veille sanitaire, conformément à l'article L.1413-4 du code de la santé publique ;
- la mise à disposition de ces données vers les administrations responsables des activités nucléaires et le public ;
- la conservation et l'archivage de ces données, sans limitation de durée.

Le système d'information du RNM, développé par l'IRSN, permet aux acteurs de la mesure de radioactivité d'envoyer, par un mode de transfert sécurisé via Internet, leurs données formatées selon un protocole d'échange d'informations qui a été défini en commun (cf. figure 12).

Ces envois alimentent la base de données centrale du réseau national qui a déjà réceptionné près de 1,5 million de résultats de mesures (chiffre au 31 décembre 2014) depuis sa mise en service en janvier 2009, avec une fréquence d'actualisation importante (en moyenne 25.000 mesures sont ajoutées chaque mois). Plus de 50 % des résultats transmis au RNM sont issus des réseaux de surveillance de l'IRSN (avec une forte proportion de mesures de dose ambiante, dont le parc a augmenté à partir de 2012, cf. figure 13).

FIGURE 12 / SCHEMA D'ORGANISATION DU SYSTEME D'INFORMATION DU RNM

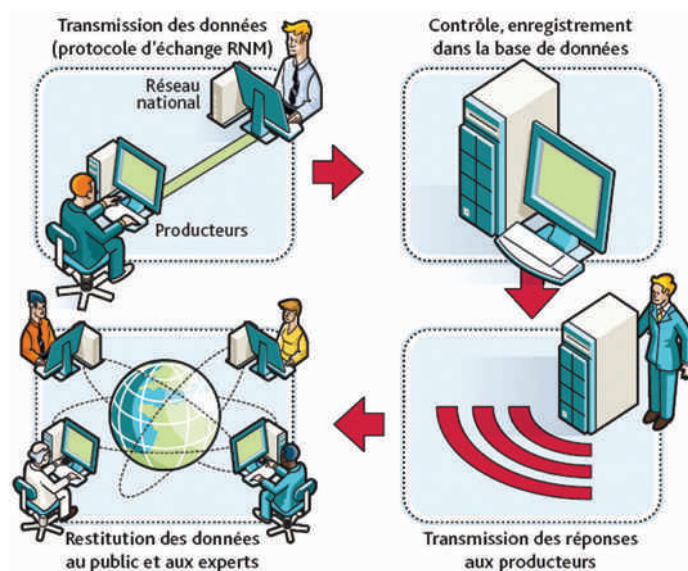
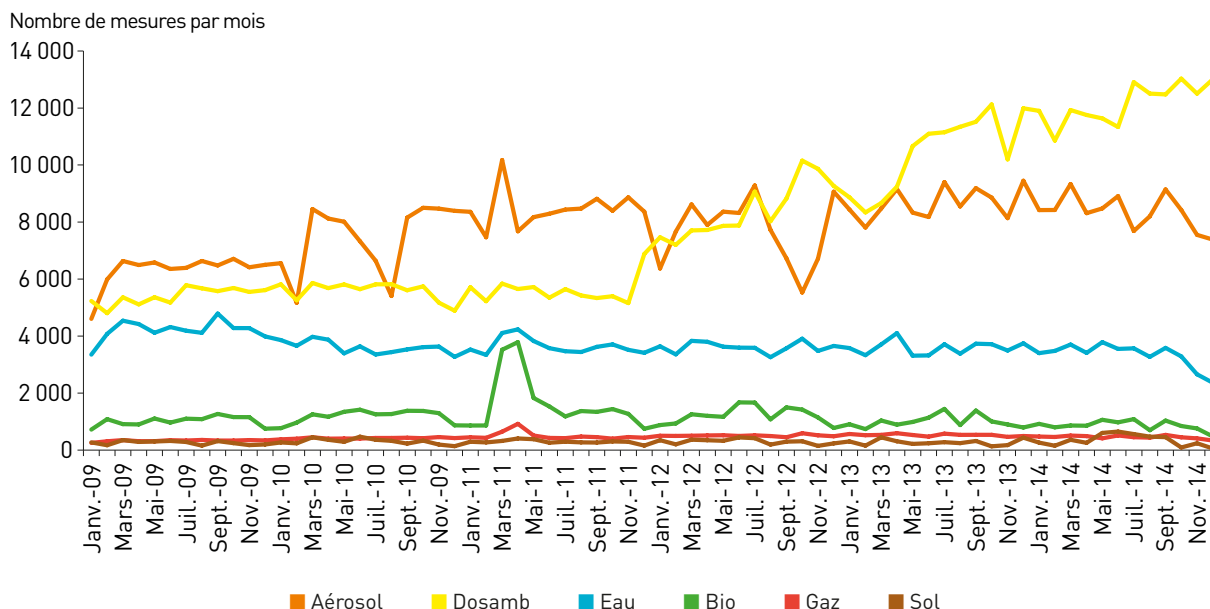


FIGURE 13 / ÉVOLUTION DU NOMBRE DE MESURES PAR MOIS, ASSOCIÉE AUX DIFFÉRENTS TYPES DE PRÉLÈVEMENTS (PAR COMPARTIMENT)



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). L'ouverture du site Internet du RNM a constitué une étape importante de la démarche de transparence.

Le développement du RNM est conduit avec le souci de prendre en compte les préoccupations de tous les acteurs qui y contribuent en tant que fournisseur de données ou membres des instances du réseau. La présentation visuelle, le contenu pédagogique, l'accessibilité et la

compréhension des données mises en ligne constituent des pistes d'évolution d'ores et déjà identifiées par ces acteurs. 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. Ainsi, la définition d'une nouvelle version du site web www.mesure-radioactivite.fr est en cours ; Elle devra prendre en compte les retours des utilisateurs, et les attentes du grand public. Sa mise en ligne est prévue pour 2016.



© L. Zylberman/Graphix-Images/IRSN



O2

LE « BRUIT DE FOND » RADIOLOGIQUE FRANÇAIS

2.1. SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENT ET D'EXPOSITION	36
Les radionucléides telluriques dans l'environnement	37
Les radionucléides cosmogéniques dans l'environnement	42
2.2. EXPOSITION DE LA POPULATION AUX SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENT	46
Débit de dose dans l'air et doses externes efficaces individuelles	46
Dose par ingestion de radionucléides naturels <i>via</i> l'alimentation et le tabagisme	50
Dose par inhalation de radon	51
2.3. RÉMANENCE DES RETOMBÉES RADIOACTIVES ANCIENNES ET EXPOSITIONS ASSOCIÉES	53
Retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires	53
Retombées de l'accident de Tchernobyl	56
Retombées de l'accident de Fukushima	57
2.4. GAMME DES DOSES LIÉES AU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	60

O2

LE « BRUIT DE FOND » RADIOLOGIQUE FRANÇAIS

On désigne par « bruit de fond » radiologique les activités des différents radionucléides présents dans l'environnement, ainsi que les expositions auxquelles est soumise la population, en dehors de toute influence anthropique actuelle (industrie nucléaire, autres industries, rejets hospitaliers...). Ce bruit de fond résulte d'une part de sources naturelles de rayonnement, et d'autre part de la rémanence d'apports anciens de radionucléides qui ont concerné l'ensemble du pays et qui continuent d'exposer sa population. Il s'agit notamment des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et des retombées de l'accident de Tchernobyl.

2.1. SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENT ET D'EXPOSITION

Les deux sources naturelles de rayonnement et d'exposition des personnes sont les radionucléides telluriques et le rayonnement cosmique, ce dernier étant lui-même à l'origine des radionucléides cosmogéniques.

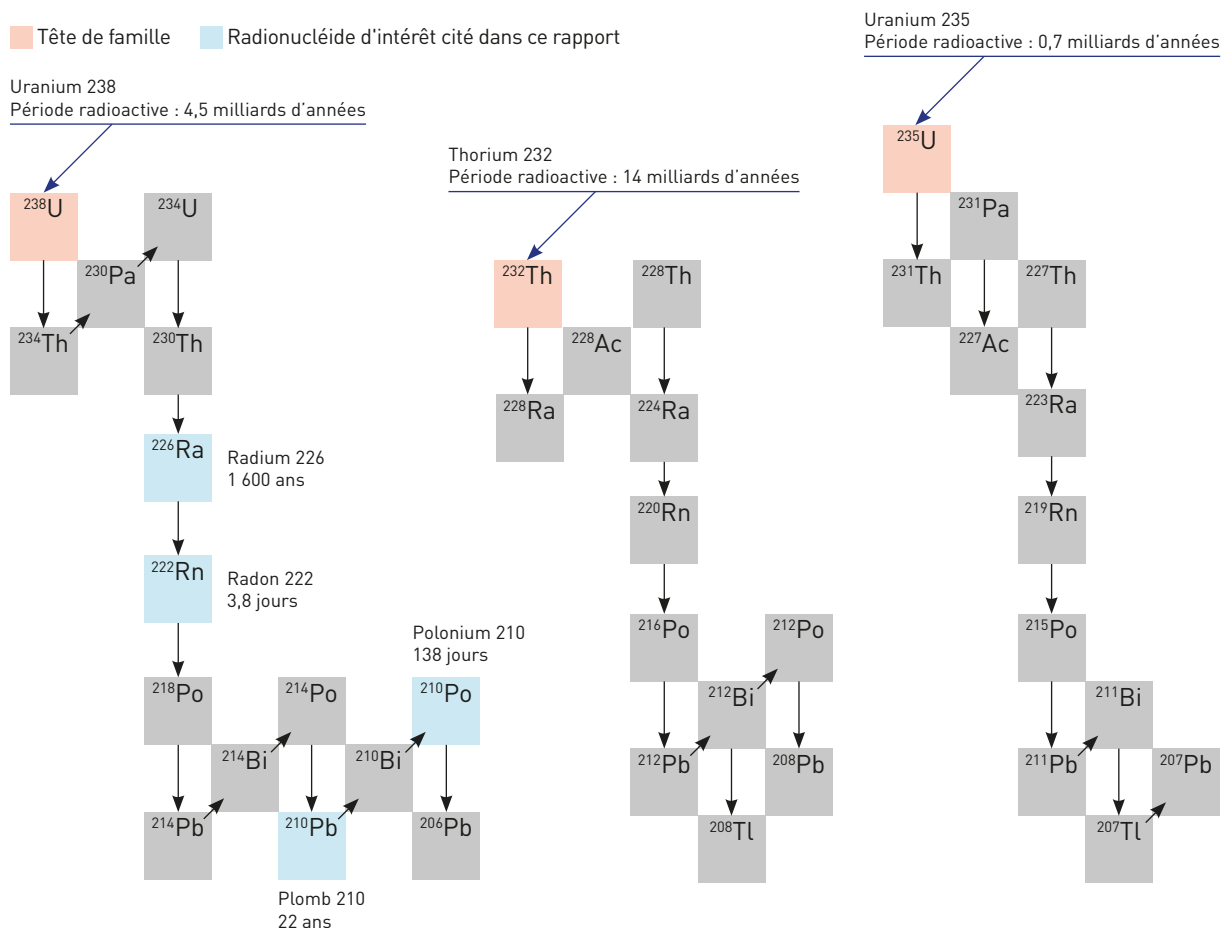
Les radionucléides telluriques sont présents sur terre depuis sa formation. Il s'agit principalement du potassium 40 (^{40}K), et des produits des chaînes de désintégration de l'uranium 238 (^{238}U), de l'uranium 235 (^{235}U) et du thorium 232 (^{232}Th). Provenant de l'écorce terrestre, ces quatre radionucléides persistent encore aujourd'hui en raison de leur très longue période radioactive (de l'ordre de plusieurs milliards d'années). ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th produisent par désintégrations successives 36 radionucléides (cf. figure 1).

Au total c'est donc une quarantaine de radionucléides telluriques qui sont présents dans toutes les composantes de l'environnement : les sols, l'air, les eaux, la flore et la faune dont l'homme. Les radionucléides telluriques sont à l'origine de trois types d'exposition :

- une exposition externe au rayonnement qu'ils émettent à partir principalement des sols, composante de l'environnement dans laquelle leur teneur est la plus élevée ;
- une exposition interne par ingestion de denrées dans lesquels ils sont transférés *via* le sol, l'air ou l'eau ;
- une exposition interne par inhalation, résultant notamment de la présence dans l'air de descendants radioactifs du radon (^{222}Rn principalement), un radionucléide gazeux qui émane des sols.

Le rayonnement cosmique provient du soleil et de l'espace (autres soleils et galaxies). Il est composé essentiellement de protons. Ces protons interagissent avec les atomes de la haute atmosphère ce qui engendre, d'une part un rayonnement cosmique « secondaire » composés d'électrons, de protons, de photons, de neutrons..., et d'autre part la production de radionucléides « cosmogéniques » : du tritium (^3H), du carbone 14 (^{14}C), du béryllium 7 (^7Be) et du sodium 22 (^{22}Na) notamment. Les rayonnements cosmiques induisent un débit de dose dans l'air à l'origine d'une exposition externe des personnes. Les radionucléides cosmogéniques présents dans l'air sont principalement à l'origine d'une exposition par inhalation et leur transfert dans les denrées conduit à une exposition par ingestion.

FIGURE 1 / CHAÎNES DE DÉSINTÉGRATION DE L'URANIUM 238, DU THORIUM 232 ET DE L'URANIUM 235



Les radionucléides telluriques dans l'environnement

• Le potassium 40

Le potassium est un élément très répandu sur terre où il est contenu dans de nombreux minéraux. Même si le potassium ^{40}K ne représente seulement que 0,0117 % de la masse du potassium, cette très faible fraction suffit à faire de ce radionucléide le plus abondant dans l'environnement avec des activités de plusieurs centaines de Bq/kg dans les sols et les sédiments continentaux et marins. Élément majeur pour les organismes vivants, le potassium (dont le ^{40}K) est fortement transféré aux végétaux et animaux, ce qui explique les activités de l'ordre de la centaine de Bq/kg dans les denrées (cf. figure 3). Ces activités sont de loin les plus importantes de tous les radionucléides naturels et artificiels présents dans l'environnement.

• Les radionucléides des chaînes de désintégration de l'uranium 238, du thorium 232 et de l'uranium 235

Les activités en uranium et en thorium des principales composantes de l'environnement terrestre : air, végétaux, animaux, eaux de surface et sédiments, ainsi que les eaux souterraines, sont liées à celles du sol et à celles des formations géologiques sous-jacentes. De manière générale, les sols des bassins sédimentaires (bassin parisien, bassin aquitain) et des formations calcaires sont plus pauvres en uranium que ceux des massifs anciens (Massif armoricain, Massif central, Vosges). Les activités en uranium 238 et en thorium 232 sont égales dans les sols français et varient entre quelques Bq/kg sec et quelques centaines de Bq/kg sec, pouvant atteindre le millier de Bq/kg sec dans des sols granitiques uranifères. La moyenne des analyses effectuées par l'IRSN toutes régions, sites et type de sol confondus, est de 40 Bq/kg sec pour chacun des deux radionucléides.

FIGURE 2 / ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ²³⁸U ET ⁴⁰K DANS LES SOLS ET LES SÉDIMENTS FLUVIAUX ET MARINS



FIGURE 3 / ^{238}U , ^{235}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po ET ^{40}K DANS LES DENRÉES

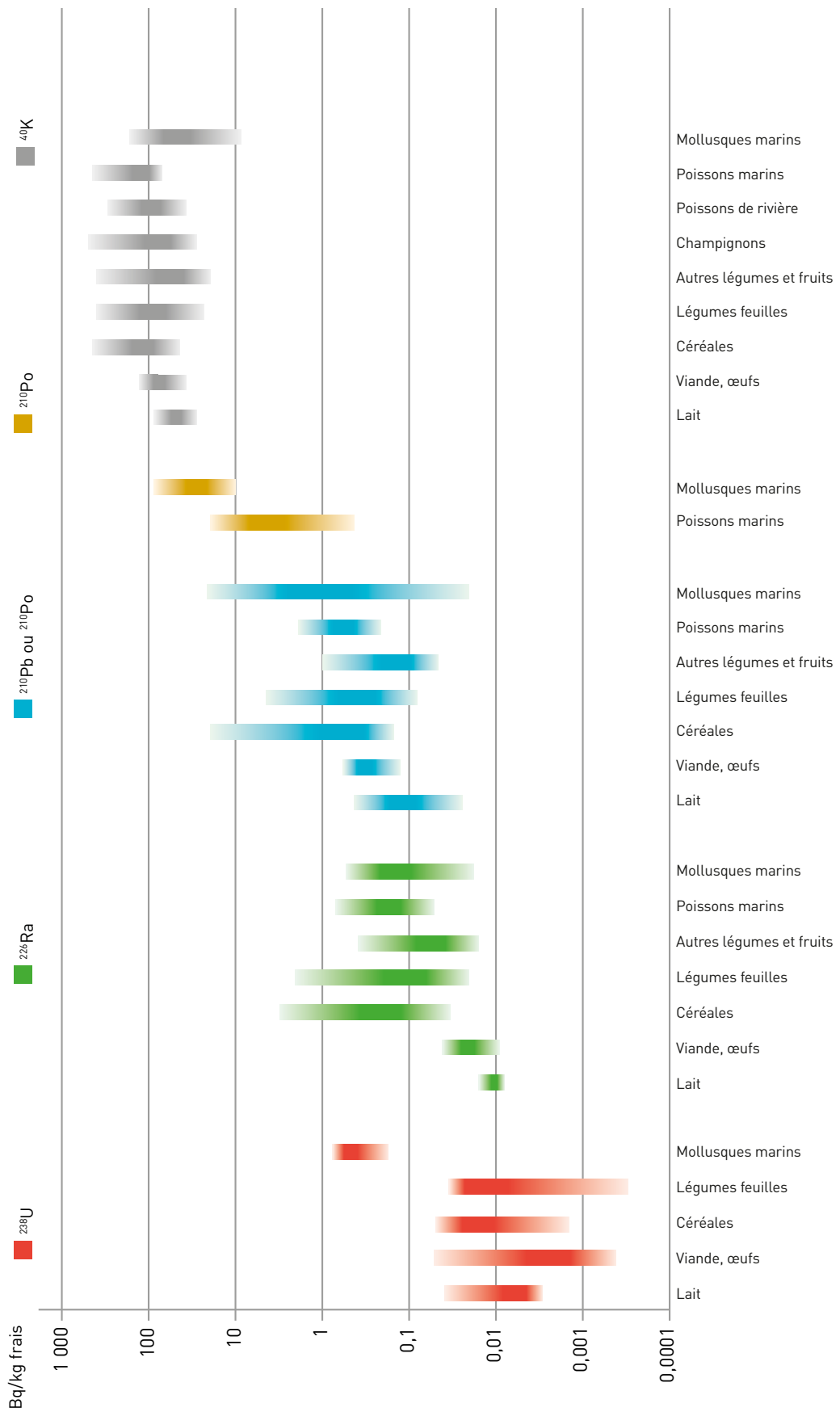
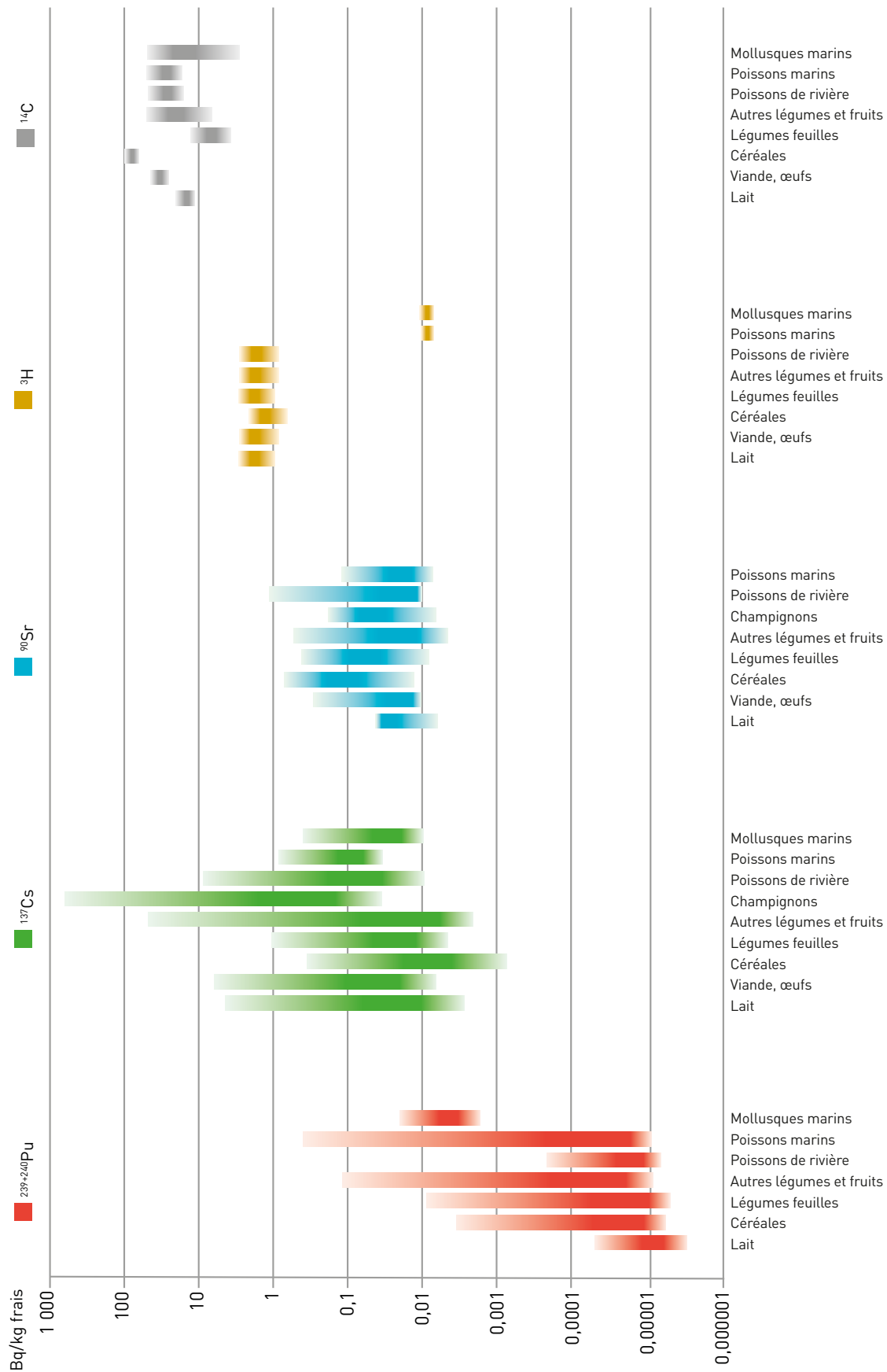


FIGURE 4 / ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ³H ET ¹⁴C DANS LES DENRÉES



Les activités en uranium 238 sont 20 fois plus fortes que celles de ^{235}U ou ^{232}Th . Ce rapport de 20 entre les activités des deux isotopes de l'uranium est caractéristique de l'uranium naturel. Un rapport plus faible traduit un enrichissement en uranium 235 (uranium enrichi), un rapport plus élevé correspond à de l'uranium appauvri ; un rapport différent de 20 résulte donc d'une action humaine. L'enrichissement de l'uranium pour produire le combustible nucléaire, entraîne également un enrichissement en uranium 236 (un autre isotope de l'uranium) qui peut devenir mesurable dans l'environnement, attestant indubitablement d'une origine industrielle.

Dans les sols, tous les radionucléides des chaînes de l'uranium et du thorium présentent des activités égales à celles de leur tête de chaîne respectif (^{238}U , ^{232}Th ou ^{235}U) et ceci jusqu'au radium (^{226}Ra , ^{224}Ra ou ^{223}Ra respectivement) : on dit qu'ils sont en équilibre. Par exemple l'activité en ^{226}Ra d'un sol est égale à celle de ^{238}U . Ce n'est pas le cas dans l'eau ni dans les organismes vivants, en raison de leurs propriétés bio-chimiques qui induisent des comportements et transferts différents. Dans les sols ce n'est également plus le cas après les isotopes du radium. En effet, en se désintégrant, le radium produit un gaz radioactif, le radon (^{222}Rn et ^{220}Rn) qui diffuse à travers le sol et émane dans l'air, rompant l'équilibre pour la fin de la chaîne de désintégration. En se désintégrant, le radon produit des radionucléides qui se fixent aux particules en suspension dans l'air. Parmi ces radionucléides, le polonium 210 (^{210}Po) et le plomb 210 (^{210}Pb) qui ont une période radioactive longue, se déposent à la surface du sol. Ce dépôt se traduit notamment par des activités des sols de surface légèrement plus élevées en ^{210}Pb qu'en uranium 238 ou en radium 226.

Par ailleurs, diverses activités industrielles non nucléaires sont susceptibles de renforcer le bruit de fond en radionucléides naturels telluriques (combustion de charbon, traitement de divers minerais, activités de verrerie, fonderie, sidérurgie et métallurgie, production d'engrais phosphatés, cimenterie...), on parle alors de radioactivité naturelle renforcée.

Les radionucléides telluriques du sol sont absorbés par les racines des végétaux. Ceux présents dans l'air, notamment ^{210}Po et ^{210}Pb descendants du radon, se déposent sur leurs feuilles. L'absorption du radium par les racines des végétaux est beaucoup plus forte que celle des isotopes de l'uranium ou du thorium. Il en résulte une activité en radium des végétaux plus importante. Les végétaux les plus exposés aux descendants du radon dans l'air, comme les légumes-feuilles (salades ou épinards par exemple) ou les céréales, présentent les activités en ^{210}Pb et ^{210}Po les plus élevées.

Le transfert aux animaux d'élevage et aux produits animaux (lait, viande, œuf) se fait essentiellement par l'alimentation. Il en résulte que les teneurs en radium, en ^{210}Po et en ^{210}Pb des denrées d'origine animale, sont également plus élevées que celles des isotopes de l'uranium ou du thorium.

En milieu marin, les radionucléides naturels proviennent du drainage des sols continentaux et du dégazage du radon. En raison de leurs caractéristiques chimiques différentes, les radionucléides telluriques présentent dans ce milieu des comportements différents et donc des activités très différentes. L'uranium et le radium s'y trouvent principalement dissous dans l'eau, avec des activités de l'ordre de 30 à 40 mBq/L pour ^{238}U (les activités en ^{235}U étant, comme dans les sols, 20 fois plus faibles) et de l'ordre de 3 mBq/L pour ^{226}Ra . En revanche, le thorium se fixe aux particules qui sédimentent et l'activité en ^{232}Th dissous dans l'eau est extrêmement faible. Le plomb et le polonium ont également une forte propension à se fixer sur les particules mais l'enrichissement de surface dû aux apports atmosphériques (désintégration du radon), fait que leur activité dans les eaux marines de surface est quand-même de l'ordre de 0,3 à 5 mBq/L. La particularité du milieu marin réside dans les teneurs très élevées des denrées marines en polonium 210. Ceci résulte de la forte assimilation de cet élément par le plancton. Les organismes marins qui dépendent le plus directement du plancton présentent les teneurs en ^{210}Po les plus élevées. C'est le cas plus particulièrement des coquillages, des crustacés et des petits poissons (sardines, harengs, anchois).

Les teneurs en descendants des chaînes de l'uranium et du thorium des eaux de surface et des eaux souterraines et par voie de conséquence des eaux de boisson sont extrêmement variables en raison des teneurs dans les roches et les sols, et aussi des caractéristiques physico-chimiques qui peuvent varier tout au long d'un cours d'eau. Pour l'uranium 238, l'uranium 234, le radium 226 et le radium 228, les activités, majoritairement inférieures à 0,1 Bq/L (plus de 95 %), vont de moins de 0,001 Bq/L jusqu'à atteindre exceptionnellement 1 Bq/L. Des valeurs plus élevées sont observées dans les eaux de surfaces sous influence des anciens sites miniers (cf. chapitre 3).

Le plus souvent plus faibles et inférieures à 0,01 Bq/L, les activités en plomb 210 et en polonium 210 peuvent atteindre exceptionnellement 0,6 et 0,1 Bq/L respectivement.

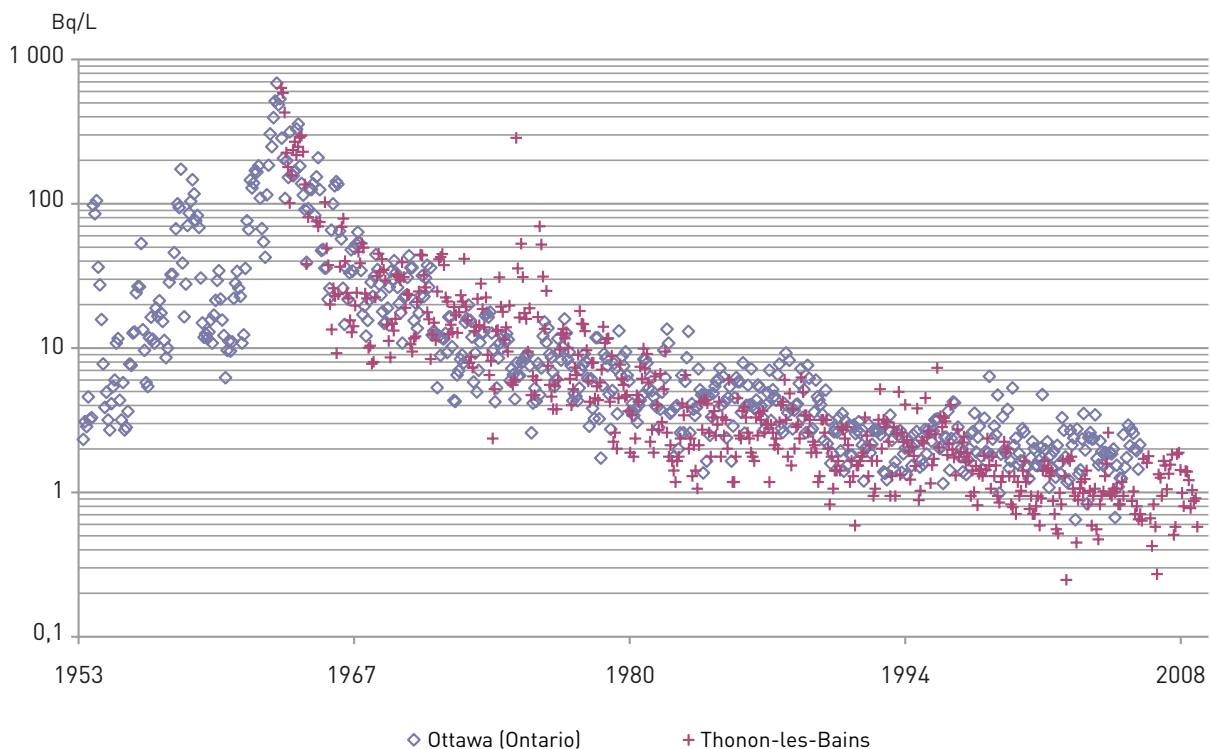
Les radionucléides cosmogéniques dans l'environnement

• Le tritium

Le tritium (^3H) est l'isotope radioactif de l'hydrogène. Sa production naturelle se fait par interaction du rayonnement cosmique avec les atomes d'azote, d'oxygène et d'argon de la haute atmosphère. L'hydrogène étant un constituant de l'eau et de la matière organique, il en est de même du tritium désigné par HTO s'il est sous forme d'eau et par TOL (pour Tritium Organiquement Lié) s'il est intégré à la matière organique. L'activité en tritium est souvent exprimée en Bq/L, qu'il s'agisse d'eau libre d'un cours d'eau, de vapeur d'eau dans l'air, d'eau extraite par séchage de la matière organique ou encore d'eau extraite par combustion de l'échantillon. L'activité en tritium d'origine naturelle est de l'ordre de 0,1 à 0,6 Bq/L, ce qui correspond à des activités de l'ordre de 0,001 à 0,005 Bq/m³ d'air et de 0,1 à 0,5 Bq/kg dans les végétaux et animaux.

FIGURE 5 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ EN TRITIUM DE L'EAU DE PLUIE (Bq/L ; source AIEA)

La concordance des données acquises au Canada (Ottawa) et en France (Thonon-les-Bains) montre la très grande homogénéité du tritium atmosphérique rémanent des retombées des essais d'armes nucléaires à l'échelle de tout l'hémisphère Nord.

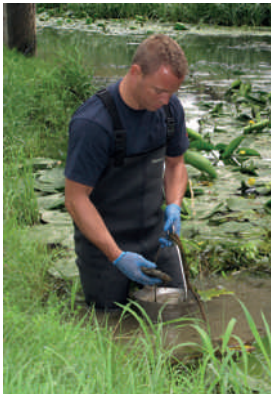


De grandes quantités de tritium ont été produites lors des essais atmosphériques d'armes nucléaires dans l'hémisphère nord de 1945 à 1980, mais principalement entre 1953 et 1963. À son maximum en 1963, l'activité en tritium dans l'eau de pluie a atteint 600 Bq/L, comme le montre la figure 5, soit plus de 1 000 fois la valeur naturelle, ce qui correspond à une activité de 6 Bq/m³ d'air. Elle a depuis diminué après 1963 en raison de l'arrêt des essais nucléaires atmosphériques américano-soviétiques, pour être aujourd'hui de l'ordre de 0,3 à 2 Bq/L, soit de l'ordre de 0,005 à 0,01 Bq/m³ d'air et de 0,5 à 2 Bq/kg frais dans

les végétaux et animaux. Il est difficile de savoir si et quand ce bruit de fond va rejoindre le niveau naturel antérieur aux essais nucléaires car la diminution semble maintenant plus faible. Enfin, les retombées des essais nucléaires n'ont pratiquement pas affecté le milieu marin où le tritium ajouté, dilué dans la masse globale des eaux océaniques, est resté au niveau du bruit de fond cosmogénique de 0,1 à 0,2 Bq/L.

FOCUS
**TRITIUM HORLOGER :
 NIVEAU DE TRITIUM
 DANS LA RIVIÈRE DOUBS**

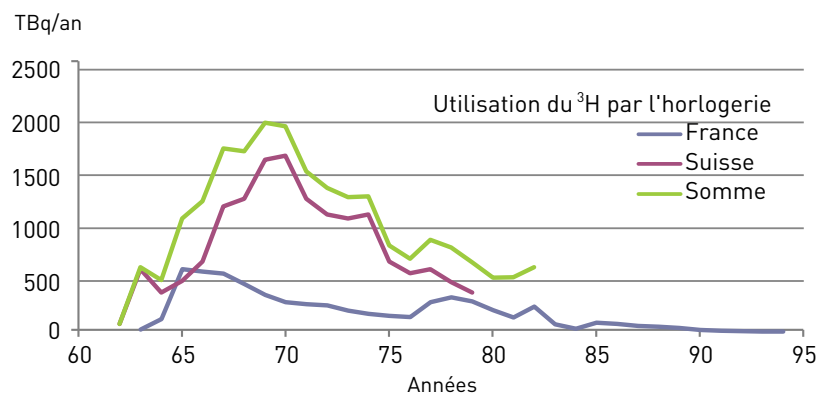
Des années 1970 aux années 2000, le tritium a été utilisé dans les ateliers d'horlogerie pour rendre lumineuse la peinture appliquée sur les aiguilles et index des montres et réveils. Les ateliers d'horlogerie français et suisses ont utilisé près de 22 000 TBq de tritium, sur plus de 20 ans (cf. figure A).



© DR

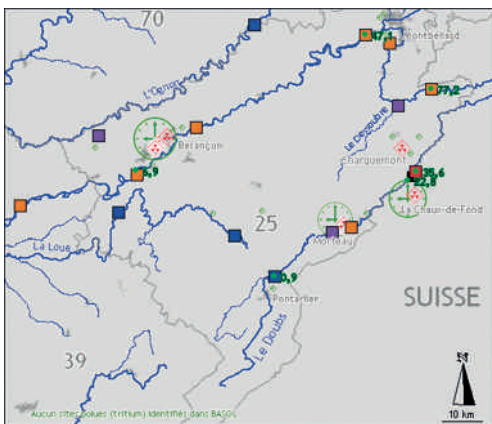
Prélèvement de sédiments dans le Doubs

FIGURE A / UTILISATION DU TRITIUM PAR L'INDUSTRIE HORLOGÈRE



L'industrie horlogère, française et suisse, est essentiellement implantée sur le bassin versant du Rhône et en particulier, sur sa partie la plus en amont, le Doubs. Trois agglomérations ont accueilli la majorité des ateliers d'horlogerie : Besançon et Morteau en France, La Chaux-de-Fond en Suisse (cf. figure B).

FIGURE B / LOCALISATION DES ATELIERS D'HORLOGERIE DANS LE DOUBS ET EN SUISSE ET ACTIVITÉ EN TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ DANS DES SÉDIMENTS ET VÉGÉTAUX ANNUELS DU DOUBS



Nombre d'industries horlogères par commune
 Source : BASIAS



10



5



1



Utilisation ³H identifiée

Tritium organiquement lié (sédiments)

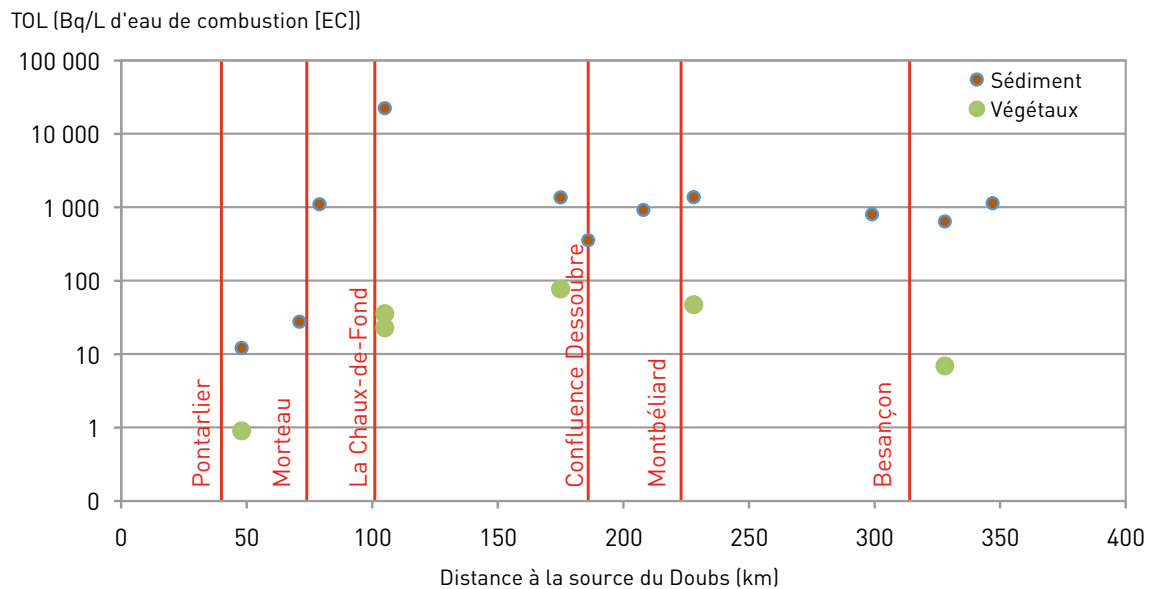
- 22 300 à 300 000 (2)
 - 1 500 à 22 300 (4)
 - 1 000 à 1 500 (7)
 - 15 à 500 (3)
 - 6,6 à 15 (5)
- Bq/L d'EC

Tritium organiquement lié (végétaux aquatiques)

- de 0,9 à 77 Bq/L d'eau de combustion (EC)

Actuellement, les activités de tritium dans les sédiments du Doubs en aval de ces trois agglomérations sont supérieures à 1000 Bq/L d'eau de combustion (cf. figure C). La rémanence du ^3H issu des ateliers d'horlogerie est encore très nette. Les activités dans les végétaux aquatiques annuels du Doubs en aval de La Chaux-de-Fond (6,9 à 77,0 Bq/L d'eau de combustion) dépassent les niveaux du bruit de fond radiologique (<1 à 3 Bq/L d'eau de combustion : exemple aval de Pontarlier). Elle est moins évidente en aval des villes et villages où les ateliers étaient moins nombreux (6,6 à 15 Bq/L d'eau de combustion à Ornans, Pontarlier, Charquemont, etc.).

FIGURE C / ACTIVITÉS EN TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ DANS LES SÉDIMENTS ET VÉGÉTAUX ANNUELS DE LA RIVIÈRE DOUBS



• Le carbone 14

Le carbone 14 est naturellement produit par interaction du rayonnement cosmique avec les atomes d'azote de la haute atmosphère. Comme le carbone stable, le carbone 14 devient alors un constituant de la matière organique. Présent dans l'air principalement sous forme de CO₂, il s'incorpore aux végétaux lors de la photosynthèse puis est incorporé par les animaux par ingestion. La production de carbone 14 cosmogénique se traduit par une activité en carbone 14 du carbone stable appelée « activité spécifique » égale à 226 Bq/kg de carbone.

Comme pour le tritium, de grandes quantités de carbone 14 ont été produites lors des essais atmosphériques d'armes nucléaires dans l'hémisphère nord. À son maximum en 1963, l'activité spécifique a atteint 420 Bq/kg de carbone, soit près du double de l'activité naturelle cosmogénique. Son activité dans l'air était alors proche de 0,1 Bq/m³. Avec l'arrêt des essais atmosphériques américains et soviétiques et l'augmentation du CO₂ de l'air, l'activité spécifique a ensuite lentement diminué pour atteindre un niveau moyen de 230 Bq/kg de C sur la période 2011-2014, soit une valeur très proche du niveau naturel (226 Bq/kg de C). Aujourd'hui, 98 % du carbone 14 mesuré dans l'environnement hors influence d'une installation nucléaire sont donc d'origine naturelle.

L'activité spécifique du carbone 14 dans les cours d'eau et les lacs est toujours inférieure à celle observée dans les autres composantes de l'environnement en raison d'une dilution plus ou moins importante par les carbonates présents dans le milieu. Suivant cette teneur en carbonates, l'activité spécifique du carbone 14 dans les cours d'eau varie actuellement entre 200 et 220 Bq/kg de C.

À partir de cette activité spécifique, il est possible de calculer l'activité massique en carbone 14 de l'air à partir du taux de CO₂, ainsi que celle des végétaux et animaux qui ne différera que par leur teneur en carbone. Ainsi, l'activité dans l'air se situe entre 0,02 et 0,06 Bq/m³, celle des denrées entre 10 et

100 Bq/kg frais suivant leur teneur en carbone. Aux activités spécifiques plus faibles observées dans les cours d'eau correspondent des activités de l'ordre de 0,02 Bq/L et de 10 à 50 Bq/kg dans les plantes aquatiques immergées ou les poissons.

2.2. EXPOSITION DE LA POPULATION AUX SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENT

Les différents éléments fournis ci-après, relatifs aux doses efficaces reçues par la population française et dues aux sources naturelles de rayonnement ou à la rémanence des retombées anciennes, sont issues du rapport IRSN 2015-00004 « Exposition de la population française aux rayonnements ionisants » téléchargeable à partir du site Internet de l'IRSN.

Débit de dose dans l'air et doses externes efficaces individuelles

• Débit de dose dans l'air

Les balises du réseau Téléray de l'IRSN (cf. chapitre 1) mesurent en permanence les débits de dose dans l'air extérieur en France. Ce débit de dose résulte d'une part du rayonnement tellurique qui dépend de la nature du sous-sol (cf. chapitre 2) et d'autre part du rayonnement cosmique qui augmente avec l'altitude, la couche d'air atténuant ce rayonnement (cf. figure 6). En France métropolitaine, le débit de dose dans l'air moyen extérieur est de 90 nSv/h, les valeurs départementales fluctuant entre 45 et 210 nSv/h (cf. figures 7 et 8). Les valeurs mesurées les plus faibles sont typiques du bord de mer et des grands bassins sédimentaires : bassin parisien (50 nSv/h à Paris) et bassin aquitain (61 nSv/h en Charentes). À l'opposé, c'est dans le Massif Central, le Massif Armoricaïn et les Vosges que les débits d'équivalents de dose dans l'air sont les plus élevés avec par exemple 135 nSv/h dans le Morbihan et 140 nSv/h en Corrèze.

FIGURE 6 / CARTE DU DÉBIT DE DOSE DANS L'AIR INDUIT PAR LE RAYONNEMENT COSMIQUE (nSv/h)

nSv/h

■ 37-50 ■ 51-80 ■ 81-120 ■ 121-220

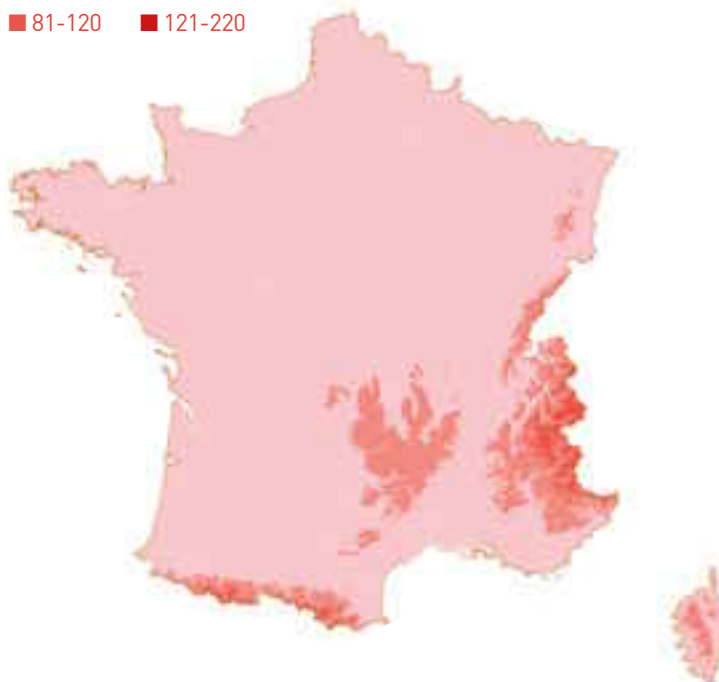
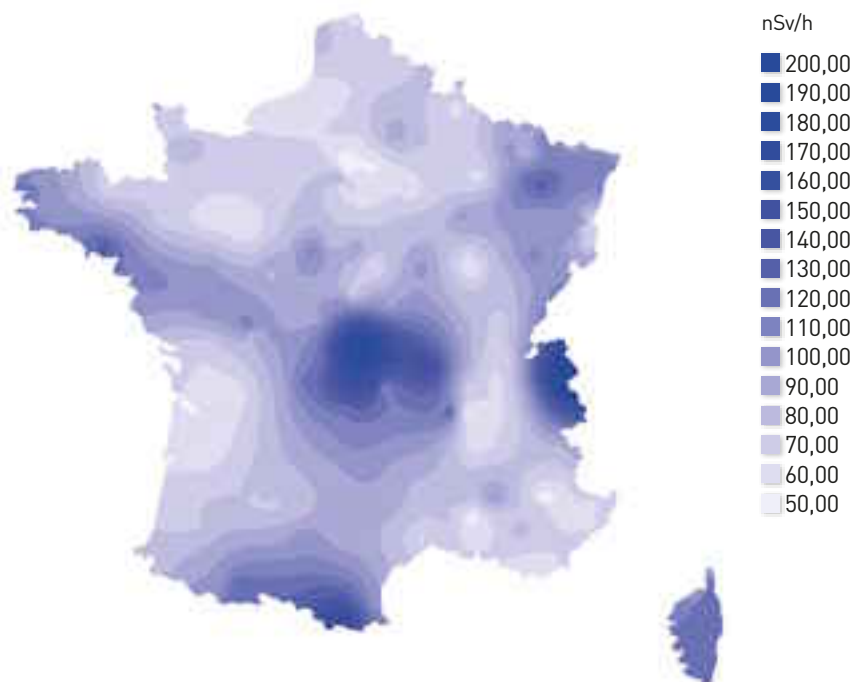


FIGURE 7 / CARTE DU DÉBIT DE DOSE DANS L'AIR EN FRANCE RÉSULTANT DES RAYONNEMENTS COSMIQUE ET TELLURIQUE, TEL QU'OBSERVÉ PAR LE RÉSEAU TÉLÉRAY DE L'IRSN, EXEMPLE DE MAI 2012 (nSv/h)



Le débit de dose fluctue également au cours du temps en fonction des variations climatiques. Au cours des mois pluvieux, le bruit de fond peut augmenter d'une dizaine de nSv/h notamment dans les zones montagneuses des massifs anciens. En effet, les phénomènes les plus fréquemment détectés par le réseau sont d'origine naturelle, liés aux conditions météorologiques telles que les orages. Lors de ces épisodes pluvieux, le lessivage puis la précipitation au sol des produits de fission émetteurs gamma du radon 222, provoquent une augmentation du débit de dose gamma ambiant (voir le *Bilan Radiologique 2012* de l'IRSN). Ceci est d'autant plus important que le sol est riche en éléments radioactifs naturels.

• Doses efficaces externes

Les doses externes efficaces reçues par la population diffèrent des doses mesurées à l'extérieur et présentées précédemment. En effet, une personne passe l'essentiel de son temps à l'intérieur de constructions : 22 h/j en moyenne et 16 h/j pour un travail en extérieur. Les constructions atténuent le rayonnement cosmique et peuvent amplifier le rayonnement tellurique du fait des radionucléides présents dans les matériaux entourant les personnes. Ainsi le rayonnement cosmique à l'intérieur est estimé comme étant 20 % plus faible qu'à l'extérieur. À l'inverse, le rayonnement tellurique est en moyenne 40 % plus élevé à l'intérieur qu'à l'extérieur.

La dose efficace moyenne due au rayonnement cosmique pour l'ensemble du territoire est évaluée à 0,31 mSv/an. Pour 95 % des personnes elle est inférieure à 0,36 mSv/an mais peut atteindre 1,68 mSv/an pour les communes situées en altitude. Ainsi, pour la majeure partie de la population, l'exposition au rayonnement

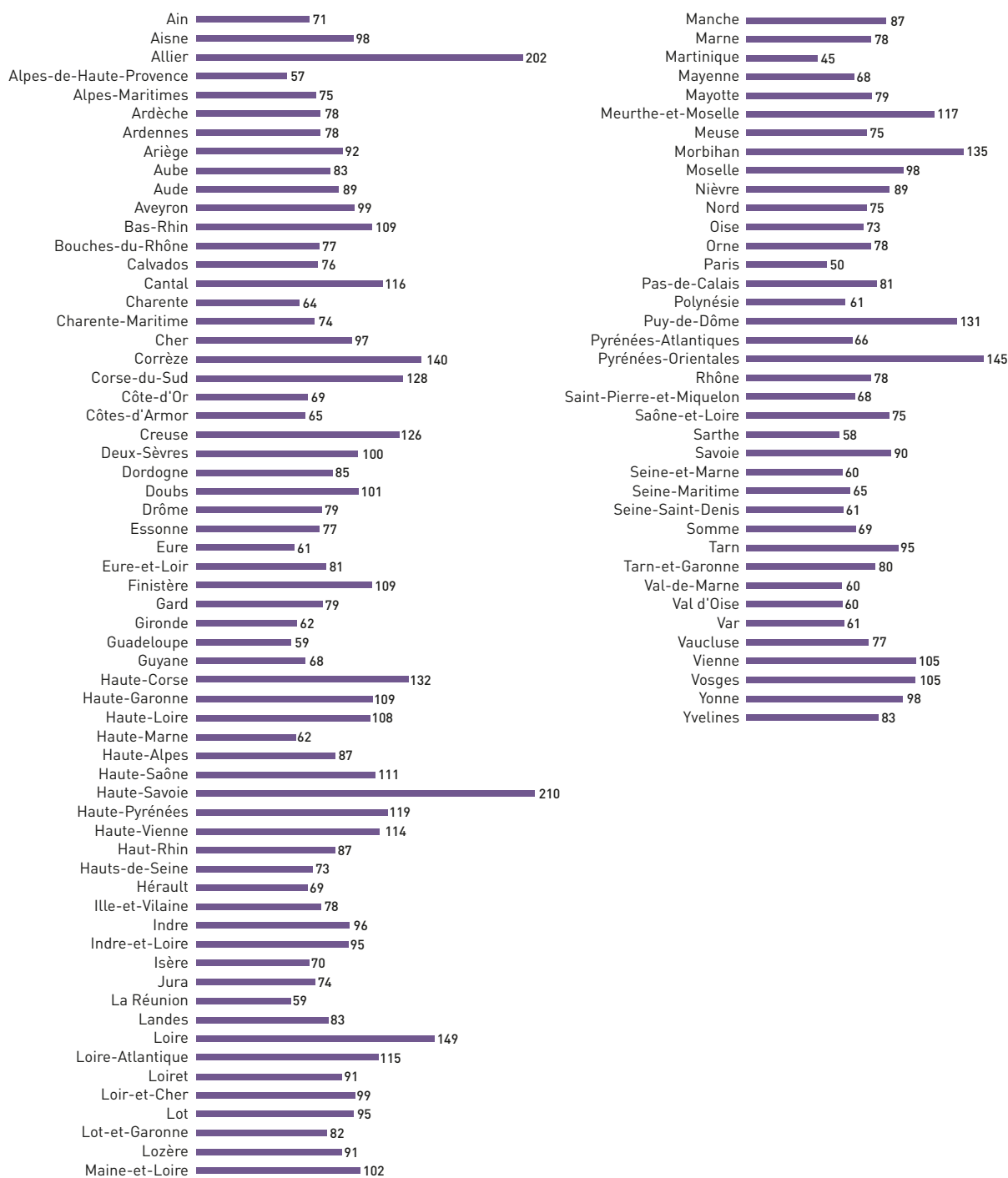
cosmique est peu variable si l'on excepte les communes d'altitude et les expositions lors des trajets aériens. En effet, les personnes amenées à voyager en avion sont soumises à des expositions supplémentaires. Compte tenu du faible nombre moyen de trajets par habitant, cette exposition supplémentaire est de seulement 0,01 mSv/an en moyenne pour l'ensemble de la population, mais elle est de 0,55 mSv/an en moyenne pour les voyageurs fréquents, c'est-à-dire ceux effectuant entre dix et trente vols par an (soit environ 11 % des passagers ou 3 % de la population). Avec une dose efficace individuelle moyenne de 1,9 mSv/an en 2013 (cf. rapport IRSN/PRP-HOM/2014-007 « exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : bilan 2013 »), les personnels navigants représentent la population de travailleurs la plus exposée aux rayonnements ionisants en moyenne.

L'exposition aux rayonnements telluriques dépend du sous-sol et des matériaux utilisés mais assez peu du type d'habitation (individuel ou collectif). Les données de mesures utilisées proviennent de dosimètres témoins placés dans 17 404 établissements dentaires et vétérinaires répartis sur le territoire. Sur la base de ces résultats et après déduction de la contribution due au rayonnement cosmique, la dose efficace moyenne française due au rayonnement tellurique est de 0,62 mSv/an, la majeure partie de la population (90 %) recevant une dose comprise entre 0,36 et 1,1 mSv/an. Cette dose peut atteindre 2 mSv/an dans certaines communes.

FIGURE 8 / MOYENNES DU DÉBIT DE DOSE GAMMA AMBIANT PAR DÉPARTEMENT OBSERVÉES SUR LA PÉRIODE JUILLET 2011-DÉCEMBRE 2012 (nSv/h)

La moyenne la plus importante, 210 nSv/h, est relevée sur la balise du département de Haute-Savoie placée sur la plateforme de l'Aiguille du Midi à 3 842 mètres. À cette altitude, la part relative aux rayonnements cosmiques devient très importante, ce qui explique la valeur deux fois plus élevée que la moyenne nationale. La valeur particulièrement élevée de la balise de Montluçon dans l'Allier, s'explique par l'influence du bâti naturellement radioactif sur laquelle elle est fixée.

Moyennes départementales des débits de doses mesurés par les sondes de l'IRSN



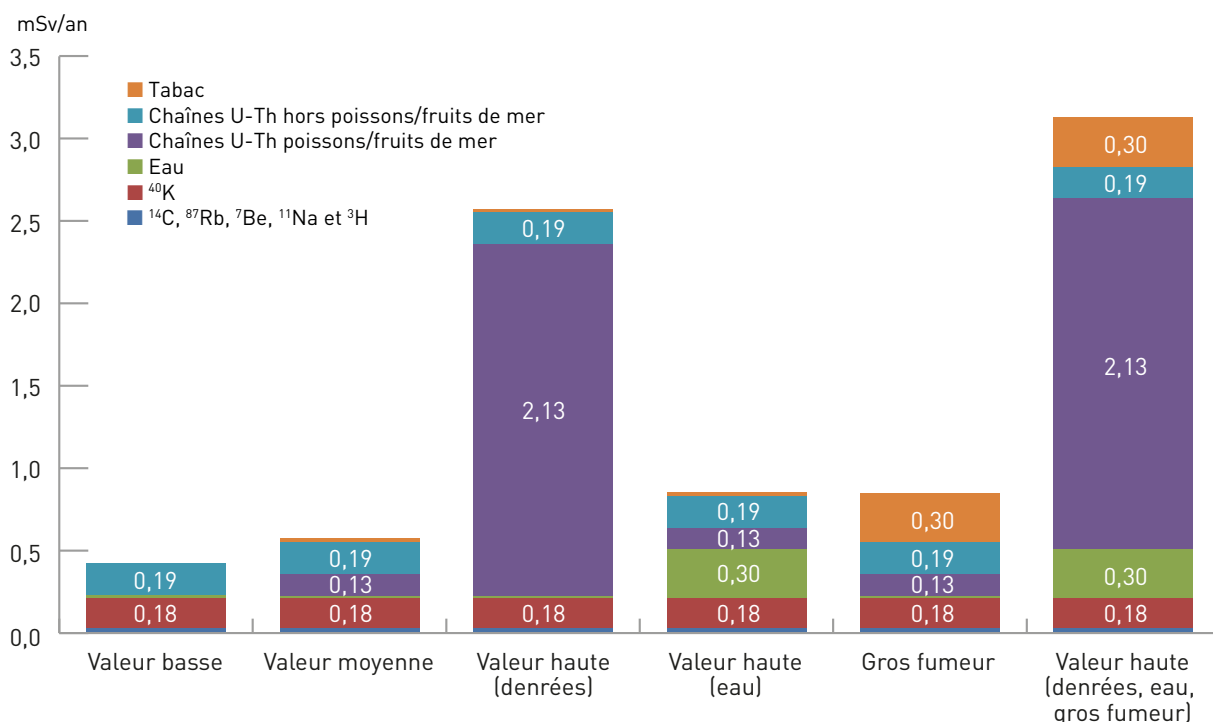
Dose par ingestion de radionucléides naturels via l'alimentation et le tabagisme

La dose efficace moyenne liée à l'incorporation de radionucléides naturels liée à l'ingestion de denrées et au tabagisme est estimée à 0,55 mSv/an. Cette dose ne varie pas en fonction de la région mais des habitudes de consommation de chacun, en particulier de poissons/fruits de mer et du tabac, dans une gamme allant de 0,4 mSv/an pour les personnes ne consommant pas ces produits et jusqu'à plus de 3,1 mSv/an pour celles en consommant de façon importante (cf. figure 9). Bien que le potassium 40 représente une part importante (30 %) de cette dose, cette part varie très peu d'un individu à l'autre et ne dépend pas des habitudes alimentaires, le potassium étant régulé par l'organisme (kaliémie). Par ailleurs,

les radionucléides cosmogéniques sont de faibles contributeurs (0,02 mSv/an soit moins de 4 %). La dose efficace moyenne liée aux descendants des chaînes de l'uranium et du thorium présents dans les denrées alimentaires est de 0,32 mSv/an, ce qui représente près de 60 % de la dose totale due à l'ingestion de denrées. Elle est extrêmement variable car liée à la consommation de poissons et surtout de coquillages et de crustacés qui présentent des teneurs élevées en ^{210}Po . Par rapport à une personne qui ne consomme jamais ces produits, une consommation très régulière de coquillages et de crustacés (1 à 2 fois par semaine), conduit à une dose efficace supplémentaire de 0,54 mSv/an, doublant ainsi la dose totale moyenne due à l'ingestion de denrées. De même, un gros fumeur peut recevoir une dose efficace supplémentaire de l'ordre de 0,3 mSv/an par rapport à un non-fumeur, en raison principalement de la teneur en ^{210}Po du tabac.

FIGURE 9 / SYNTHÈSE DES DOSES (EXPRIMÉES EN mSv/an) DUES À L'INCORPORATION PAR UN ADULTE DE RADIONUCLÉIDES NATURELS

La valeur basse correspond à une personne qui ne fume pas, ne consomme pas une eau chargée en radionucléides naturels et ne consomme pas de coquillages et de crustacés ; la valeur haute « denrées » correspond à une personne consommant beaucoup de fruits de mer ; la valeur haute « eau » correspond à une personne consommant une eau chargée en radionucléides naturels.



Enfin, les teneurs en radionucléides des eaux de boisson (eau du robinet et eau en bouteille) étant extrêmement variables, la dose reçue par une personne est directement liée à l'eau de son robinet ou à l'eau minérale de son choix et pas à une moyenne nationale. Ainsi, la dose reçue par les adultes *via* la consommation d'eau de boisson ne dépasse 100 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ que pour moins de 0,2 % d'entre eux s'ils boivent l'eau de leur robinet ou si leur choix s'est porté sur l'un des 4 % d'eaux conditionnées dont la consommation régulière (730 L/an) peut amener à dépasser cette dose. Pour la très grande majorité des adultes, la dose par ingestion d'eau est donc probablement comprise entre quelques $\mu\text{Sv}/\text{an}$ et 100 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

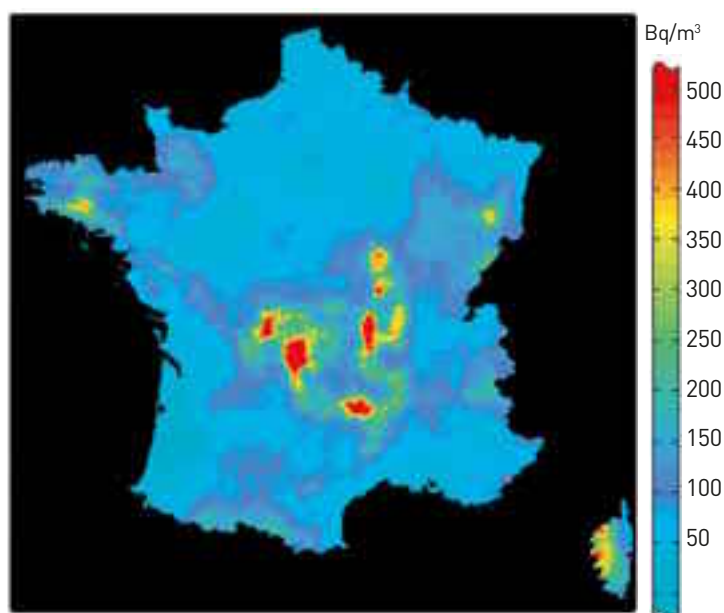
Dose par inhalation de radon

Les radionucléides issus de la désintégration du radon se fixent sur les aérosols de l'air et, une fois inhalés, se déposent le long des voies respiratoires en provoquant leur irradiation. L'accumulation de radon dans les espaces confinés tels que les bâtiments est variable selon la localisation et la nature des sols et roches sous-jacents, le type de bâtiment, le mode de construction du bâtiment et les habitudes de vie des occupants.

La concentration moyenne en ^{222}Rn à l'intérieur de l'habitat en France métropolitaine, pondérée par la population et le type d'habitat, est de 60 Bq/m^3 . La dose moyenne correspondante est estimée à 1,43 mSv/an . La carte des activités volumiques potentielles de radon à l'intérieur des habitations (cf. figure 10) montre une situation extrêmement contrastée entre une majeure partie de la France où les activités sont inférieures à 150 Bq/m^3 et quelques zones du massif central, des Vosges, d'Armorique et de l'Ouest de la Corse où les activités dépassent 400 Bq/m^3 . Ainsi, si 90 % de la population française reçoivent une dose efficace due au radon comprise entre 0,54 et 3,15 mSv/an , la dose moyenne pour des départements comme la Lozère ou le Cantal atteint 5 à 6 mSv/an . Des valeurs supérieures, peuvent être atteintes très localement (20 mSv/an). Enfin, il faut signaler le cas d'habitations construites sur des résidus miniers où les activités en radon dans l'air peuvent atteindre plusieurs milliers de Bq/m^3 avec des doses correspondantes d'autant plus élevées (cf. focus page 52).

FIGURE 10 / ACTIVITÉ VOLUMIQUE POTENTIELLE DU RADON À L'INTÉRIEUR DES HABITATIONS DÉDUITE DE LA NATURE DES ROCHES QUI COMPOSENT LE SOUS-SOL (Bq/m^3)

Les concentrations les plus élevées, supérieures à 400 Bq/m^3 , sont observées sur les massifs anciens (armoricain, central, Vosges et côte Nord-occidentale de la Corse), les valeurs les plus faibles, inférieures à 100 Bq/m^3 , sur les bassins sédimentaires (parisien et aquitain).



FOCUS
EXPERTISE DE L'IRSN
SUR LES EFFETS D'UNE
CONCENTRATION ÉLEVÉE
EN RADON DANS UNE
MAISON DE BESSINES

Dans le cadre de la campagne de recensement des lieux de réutilisation de stériles miniers d'uranium, menée par AREVA conformément à la circulaire du ministère de l'Écologie du 22 juillet 2009, des mesures réalisées début 2014 par la société Algade ont révélé des concentrations anormalement élevées de radon dans une maison de Bessines-sur-Gartempe (Haute-Vienne) construite sur des résidus de traitement de minerais d'uranium.

À la demande des pouvoirs publics, l'IRSN a été chargé d'évaluer la situation radiologique de la maison et les risques sanitaires pour les familles successives qui y ont logé et les enfants qui y ont été gardés. L'IRSN a dépêché sur place plusieurs équipes afin de :

- caractériser la situation radiologique autour de la maison et à l'intérieur de celle-ci ;
- recueillir auprès des occupants actuels, des informations sur leurs habitudes de vie (usage des différentes pièces, temps de séjour, habitudes en matière d'aération de la maison...) en vue de disposer des données nécessaires pour reconstituer au mieux l'exposition des occupants, notamment au radon ;
- réaliser des mesures individuelles d'une possible contamination interne par du radium (anthroporadiométrie et analyse radiotoxicologique urinaire).

De l'ensemble des mesures radiologiques effectuées dans la maison afin de caractériser les voies possibles d'exposition de ses occupants (exposition interne par inhalation de radon, exposition externe au rayonnement émis par le radium et ses descendants présents dans les sols et les soubassements de la maison, exposition interne par ingestion ou inhalation de radium), il ressort que l'inhalation de radon a constitué la voie essentielle d'exposition pour les personnes ayant séjourné dans la maison.

Les concentrations en radon mesurées dans les différents lieux de vie de la maison ont été estimées, elles varient de 8 500 Bq/m³ dans la cuisine en journée à 18 700 Bq/m³ dans le séjour la nuit.

L'IRSN a reconstitué les expositions au radon cumulées sur 1 an pour les différents profils d'occupants de la maison, en fonction de leur activité (personne au foyer, travailleur extérieur, enfant gardé...) et de leur âge (enfant, adolescent, adulte), en tenant compte d'une estimation des temps respectifs vraisemblablement passés dans les différentes pièces de la maison et des niveaux moyens estimés d'activité de radon dans l'air. Ces expositions cumulées sur un an varient de 6 10⁶ Bq.h/m³ pour un enfant en garderie périscolaire, à 110 10⁶ Bq.h/m³ pour un adulte travaillant dans la maison. À titre de comparaison, une personne passant 80 % de son temps dans une habitation dont la concentration en radon serait de 200 Bq/m³ (soit la concentration moyenne dans l'habitat en Haute-Vienne), aurait une exposition cumulée sur un an de 1,4 10⁶ Bq.h/m³.

Sur la base du coefficient de risque fourni par une étude épidémiologique européenne relative à l'exposition au radon dans l'habitat, l'IRSN a évalué les risques de cancer du poumon attribuable au radon pour les différents profils d'occupants. Pour des adultes ayant habité une longue durée dans la maison (typiquement plus de 10 ans), il est estimé que l'exposition cumulée au radon peut conduire à une augmentation de la probabilité de décès par cancer du poumon similaire à celle entraînée par une consommation tabagique régulière (c'est-à-dire multipliée par 10 à 15 par rapport au taux de base d'un individu n'ayant jamais fumé).

Pour les enfants ayant été gardés dans la maison, l'augmentation de la probabilité de décès par cancer du poumon est nettement plus faible et si l'on fait l'hypothèse, comme pour l'adulte, d'une décroissance du risque au-delà de 30 ans après la fin de l'exposition, l'augmentation de risque n'est plus significative. Compte tenu de l'augmentation supplémentaire des risques qui peut résulter d'une combinaison d'expositions à des toxiques pulmonaires, l'IRSN a recommandé à ces personnes d'éviter de fumer, de s'exposer encore à des taux de radon élevés et d'inhaler toute substance toxique ou irritante pour les poumons. Enfin, le groupe d'experts réuni par l'Institut National du Cancer (<http://www.e-cancer.fr/>) a préconisé un suivi médical adapté. L'IRSN a rendu son rapport d'expertise en avril 2014.

Les évaluations personnalisées de risque réalisées pour toutes les personnes concernées leur ont été communiquées lors d'entretiens individuels qui se sont déroulés à l'Agence Régionale de Santé (ARS) du Limousin dans la dernière quinzaine de mai 2014.

2.3. RÉMANENCE DES RETOMBÉES RADIOACTIVES ANCIENNES ET EXPOSITIONS ASSOCIÉES

Retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires

De 1945 à 1980 plus de 500 essais atmosphériques d'armes nucléaires ont été réalisés par les États-Unis, l'Union Soviétique, la Grande-Bretagne, la Chine et la France. L'essentiel des retombées radioactives s'est produit sur deux périodes : de 1951 à 1958 et de 1961 à 1962 avant le moratoire de 1963. Ces essais ont libéré dans l'atmosphère de nombreux radionucléides dont une vingtaine était régulièrement mesurée en France dans l'air (cf. figure 11), dans les eaux de pluies et diverses denrées. En 1963, au plus fort de ces retombées radioactives, l'activité moyenne de l'air en radionucléides artificiels a atteint 8 Bq/m³ (dont 6 Bq/m³ de tritium), celle des salades 650 Bq/kg frais (dont 1/3 de tritium et 1/5^e de carbone 14), celle du lait 450 Bq/L (cf. figure 12). Cette même année la dose moyenne reçue par la population française a été estimée à 300 µSv, principalement par ingestion de denrées contaminées. La plupart des radionucléides de période radioactive

courte (inférieure à 3 ans) issus de ces retombées ayant disparu, il ne subsiste aujourd'hui que le césium 137 (¹³⁷Cs), le strontium 90 (⁹⁰Sr), les isotopes 238, 239, 240 et 241 du plutonium (²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu et ²⁴¹Pu), et l'américium 241 (²⁴¹Am) provenant de la désintégration du ²⁴¹Pu. Pour l'ensemble de ces radionucléides, le sol constitue aujourd'hui le réservoir qui alimente les autres composantes de l'environnement : l'air par remise en suspension, les végétaux par absorption racinaire et dépôt sur les feuilles des particules remises en suspension, les cours d'eau par drainage des sols et les animaux par ingestion. La figure 13 présente la carte des dépôts cumulés de plutonium (239+240), de césium 137 et de strontium 90 dans les sols. Dans toutes les composantes de l'environnement, une activité de plutonium 238, 30 fois inférieure à celle du plutonium 239+240 caractérise les retombées des essais d'armes nucléaires (tout rapport d'activité significativement différent ne peut résulter que d'une origine locale). L'exposition actuelle de la population à la rémanence des retombées des essais d'armes nucléaires résulte principalement de l'ingestion de denrées contaminées notamment en strontium 90, césium 137 et isotopes du plutonium. Elle est de l'ordre de quelques microsievert par an.



Prélèvement de sol au carottier en Vanoise pour estimer analyser les traceurs en césium, strontium et plutonium rémanente des essais atmosphériques d'armes nucléaires

FIGURE 11 / ÉVOLUTIONS DES ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS PRÉSENTS DANS LES AÉROSOLS DE L'AIR DEPUIS 1959 (mBq/m³)

Ne sont pas représentés le plutonium 238 dont les activités sont 30 fois inférieures à celles du plutonium 239+240 et les radionucléides sous forme gazeuses : le tritium (cf. figure 5), le carbone 14, le xénon 133, le krypton 85 et l'iode 131. L'activité de l'air en krypton 85 est aujourd'hui proche de 2 Bq/m³ (2000 mBq/m³). Elle est en partie d'origine naturelle (cosmogénique) et provient également des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Sa lente augmentation (l'activité était de 1 Bq/m³ au milieu des années 80) résulte des rejets de certaines installations nucléaires. La forme gazeuse de l'iode non prise en compte dans ce graphique est souvent majoritaire dans l'air. Ainsi, après les accidents de Tchernobyl et de Fukushima, l'activité de l'air en iode 131 gazeux était 5 fois plus élevée que celle de l'iode particulaire représentée sur le graphique.

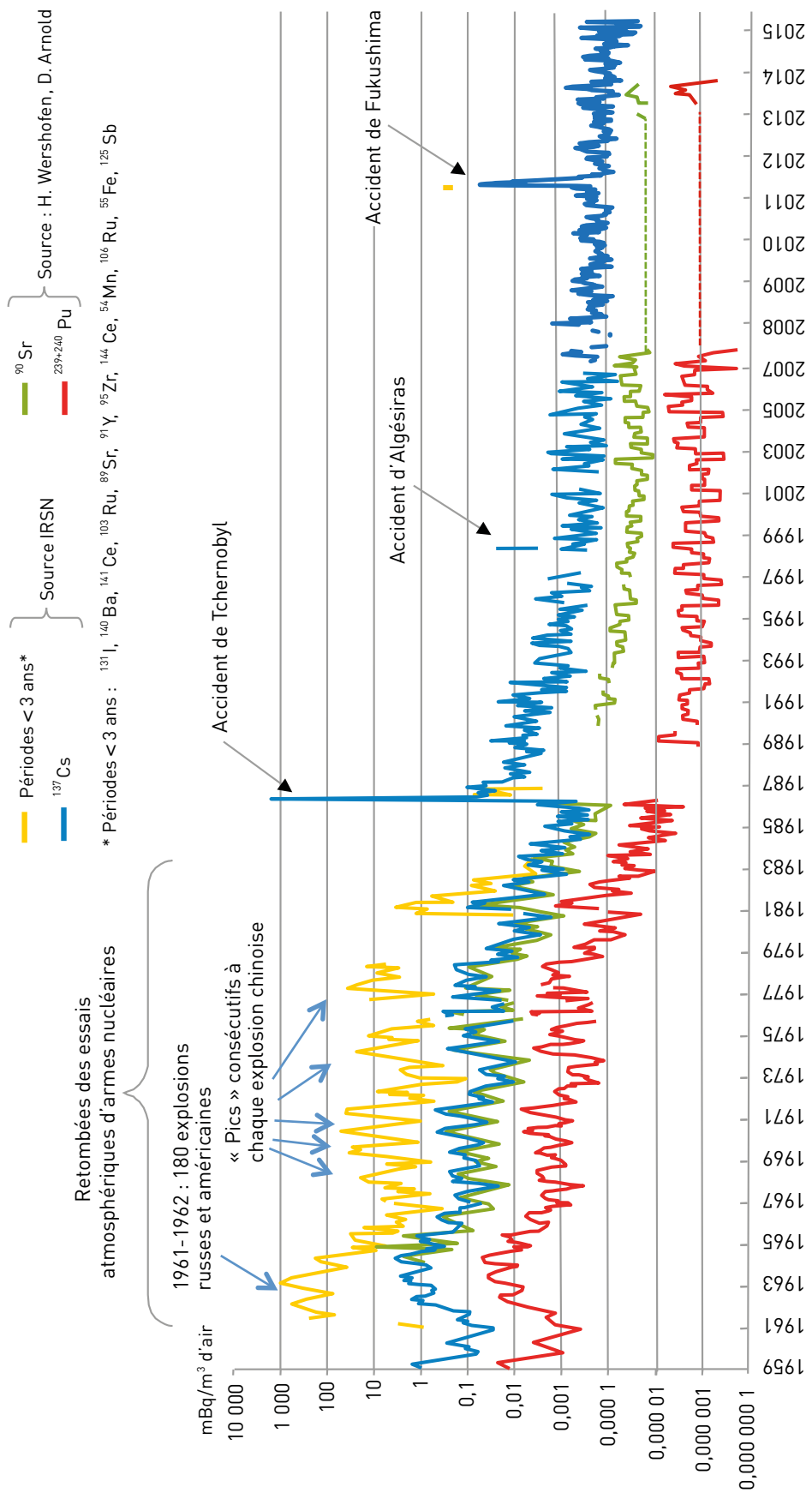


FIGURE 12 / ACTIVITÉS DES SALADES (Bq/kg) ET DU LAIT (Bq/L) EN FRANCE AU PLUS FORT DES RETOMBÉES DES ESSAIS D'ARMES NUCLÉAIRES (1963), MAXIMALES LORS DES RETOMBÉES DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL (DU 1^{ER} AU 5 MAI 1986), FIN MAI 1986, EN 2009 ET ATTENDUES DANS LES ANNÉES À VENIR

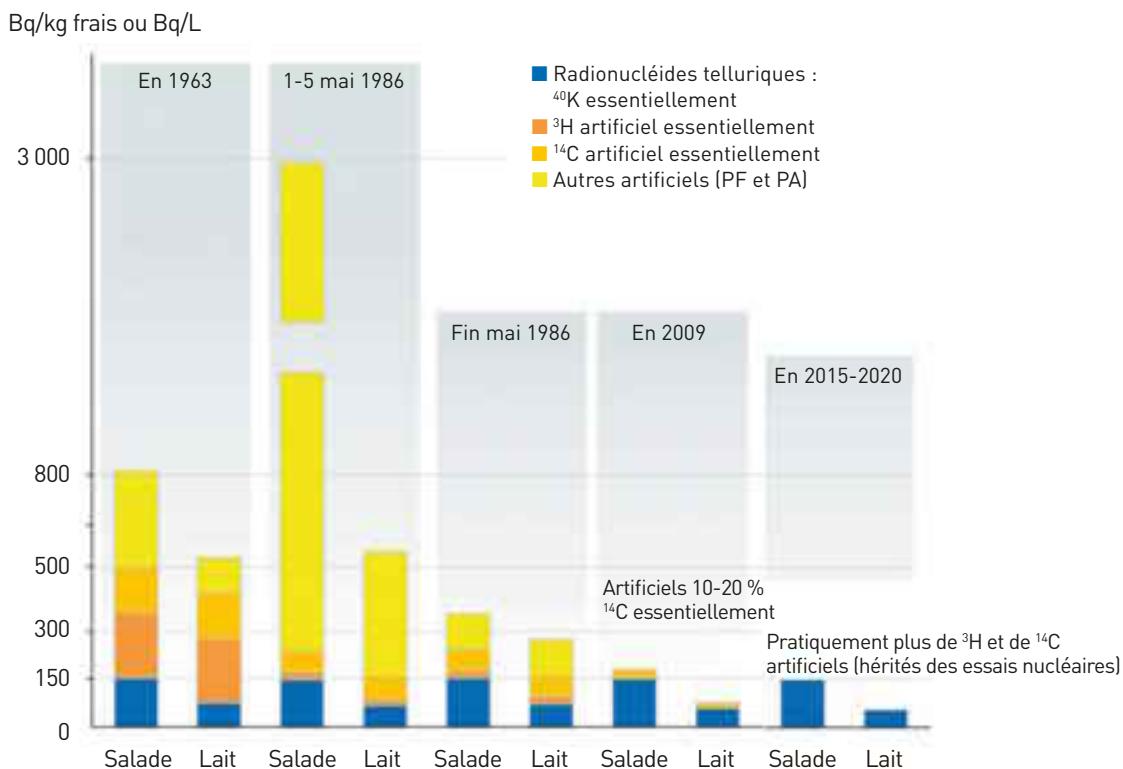
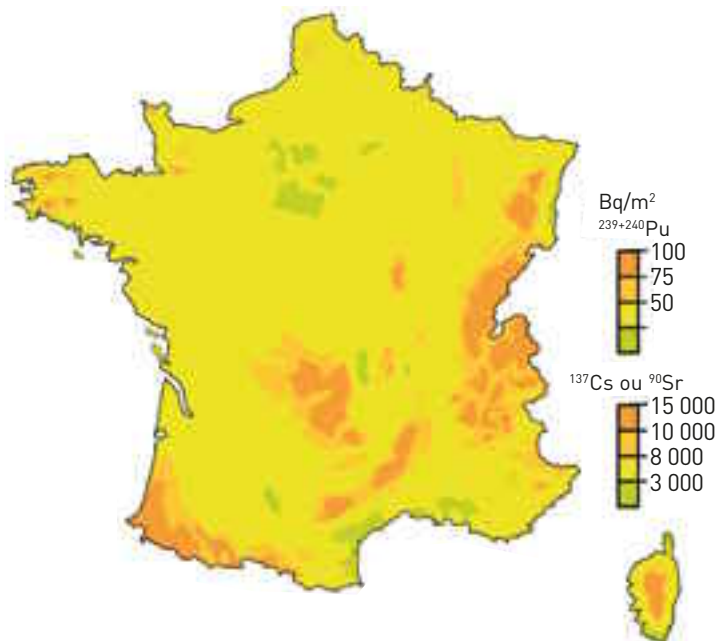


FIGURE 13 / DÉPÔTS DE CÉSIMUM 137, DE STRONTIUM 90 ET DE PLUTONIUM 239+240 AU TERME DES ESSAIS NUCLÉAIRES ATMOSPHÉRIQUES

Suite aux retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires (1945-1980) en Bq/m², les dépôts étant plus importants lors des pluies, ces activités déposées sont le reflet des précipitations moyennes annuelles.



Retombées de l'accident de Tchernobyl

Les masses d'air contaminées par l'accident de Tchernobyl ont affecté la France début mai 1986, principalement entre le 1^{er} et le 5 mai 1986. En raison des pluies très variables survenues durant cette période dans l'Est du pays, les dépôts radioactifs, notamment ceux d'iode 131 et de césium 134 et 137 ont été plus importants que dans le reste du pays et très hétérogènes (cf. figure 14). La contamination des denrées a été maximale immédiatement après les dépôts et a concerné les légumes, notamment les légumes feuilles, le lait (cf. figure 12) et plus tardivement les viandes ovines et bovines. Les activités en iode 131 ont disparu au bout de 3 mois par décroissance radioactive et celles de césium ont diminué de 100 à 1 000 fois dans ce délai. En raison de la date de l'accident très précoce dans le développement de la plupart des cultures, les grandes cultures céréalières et fruitières ont été relativement épargnées. Pour l'année 1986, les doses efficaces reçues par les adultes habitant le tiers Est du pays ont été en moyenne de 0,75 mSv (mai-décembre 1986). Les doses équivalentes à

la thyroïde moyennes des enfants qui habitaient dans l'Est du pays entre mai et juillet 1986, ont été de l'ordre de 10 mSv. L'essentiel de ces doses a résulté de l'ingestion de denrées contaminées, notamment de légumes et de lait consommés frais aux cours des trois premiers mois suivant les dépôts radioactifs. Aujourd'hui, le césium 137, toujours présent et mesurable dans les sols français (le césium 134 a quasi disparu par décroissance radioactive), continue d'exposer la population par voie externe et par ingestion de denrées. À noter que si dans l'Est du pays, le césium 137 est très majoritairement imputable aux retombées de l'accident de Tchernobyl, dans les 2/3 Ouest, il peut provenir de manière importante, voire majoritaire, des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Les doses actuellement dues aux retombées de l'accident de Tchernobyl sont de l'ordre de quelques $\mu\text{Sv}/\text{an}$ dans les 2/3 Ouest du pays et de l'ordre de quelques dizaines de $\mu\text{Sv}/\text{an}$ dans la partie Est de la France (cf. figure 15). Contrairement à celles de 1986, ces doses sont maintenant essentiellement dues à l'exposition externe au césium présent dans les sols et très peu à l'ingestion de denrées.

FIGURE 14 / CARTE DES ACTIVITÉS SURFACIQUES ACTUELLES DU CÉSIUM 137 DANS LES SOLS FRANÇAIS (Bq/m^2) LIÉES À LA RÉMANENCE DES RETOMBÉES DES ESSAIS D'ARMES NUCLÉAIRES (VOIR FIGURE 13) ET DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

Si sur les 2/3 Ouest du pays, le césium 137 peut provenir encore significativement voire majoritairement des essais nucléaires, dans les zones de l'Est de la France où il a plu début mai 1986, le césium provient très majoritairement des retombées de l'accident de Tchernobyl.

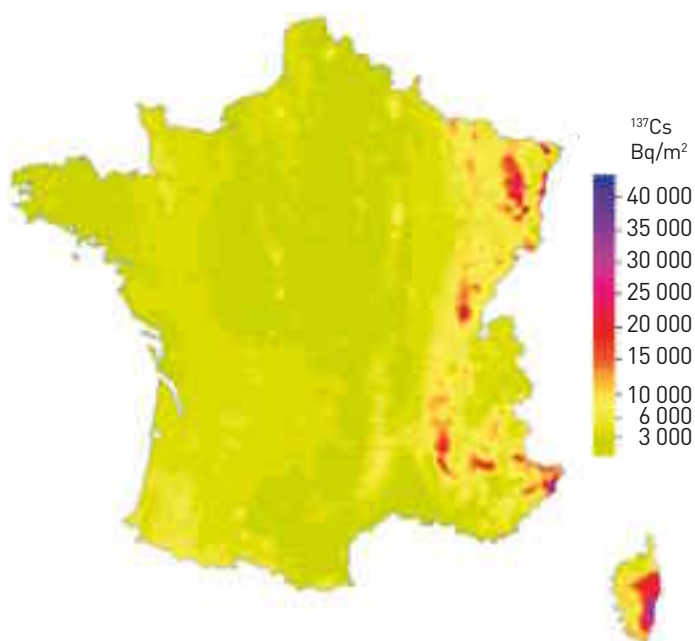
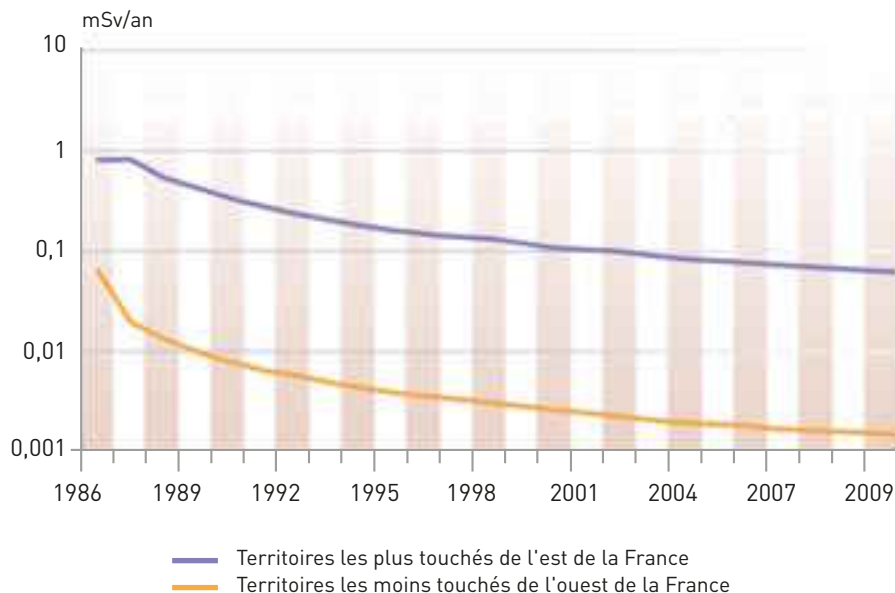


FIGURE 15 / ÉVOLUTION DE LA DOSE EFFICACE ANNUELLE TOTALE, TOUS RADIONUCLÉIDES ET VOIES D'ATTEINTE CONFONDUS, REÇUE EN FRANCE PAR UN ADULTE (mSv/an) DU FAIT DES RETOMBÉES DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL



Retombées de l'accident de Fukushima

Les retombées atmosphériques en France métropolitaine des radionucléides issus de l'accident de Fukushima, survenu le 11 mars 2011 au Japon, ont été très faibles et très fugaces : des traces d'iode 131, césiums 134 et 137 ont été détectées de fin mars jusqu'en mai 2011 dans l'air, les eaux de pluie et dans quelques denrées

(légumes feuille, lait...) avec des concentrations 500 à plus de 1 000 fois inférieures à celles mesurées en France début mai 1986 suite à l'accident de Tchernobyl. L'influence de ces dépôts n'est plus mesurable depuis mi-2011 (cf. le rapport IRSN DEI 2011-01 *Analyse de l'impact de l'accident de Fukushima en France à partir des résultats de la surveillance renforcée de la radioactivité de l'environnement* sur le site internet de l'IRSN).

FOCUS
**LE CONSTAT RADIOLOGIQUE
DE LA RÉMANENCE DE LA
RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE**

L'objectif de ce constat est de dresser un bilan actualisé des radionucléides d'origine artificielle encore présents dans les zones les plus marquées par les retombées radioactives des tests atmosphériques d'armes nucléaires (années 1950 à 1980) et de l'accident de Tchernobyl (1986).

Stratégie de prélèvement

Les zones couvertes par cette étude sont pour l'essentiel les zones montagneuses de l'est du territoire, fortement influencées par les retombées de l'accident de Tchernobyl (Vosges, Jura, Alpes et Corse) ainsi que les Pyrénées, où les dépôts des radionucléides consécutifs aux essais atmosphériques d'armes nucléaires sont prépondérants (cf. figure A). Rappelons que la vallée du Rhône et le nord-est du territoire sont le cadre de deux autres constats radiologiques^{1,2}. Une comparaison des données acquises dans le cadre de cette étude avec les observations réalisées lors d'études précédentes, permet d'apprécier l'évolution des niveaux de la radioactivité artificielle dans les différentes zones couvertes par le constat de la rémanence de la radioactivité artificielle.

FIGURE A / ZONES AYANT FAIT L'OBJET DE PRÉLÈVEMENTS DANS LE CADRE DE CE CONSTAT



Dans les différentes zones retenues, des sites d'études représentatifs d'un point de vue écologique ont été sélectionnés pour y réaliser des prélèvements de sols, de végétaux et de produits d'origine animale (viande, lait et fromage) qui feront l'objet de plusieurs types d'analyses radiologiques pour quantifier les teneurs des différents radionucléides.

1. Constat Radiologique « Vallée du Rhône » : voir Bilan de l'état radiologique de l'environnement 2012.
2. Constat Radiologique « Nord-Est » : voir Bilan de l'état radiologique de l'environnement 2010-2011.



•••

Dans les zones de pâturage, des prélèvements de sols sont réalisés dans le but d'évaluer la persistance des radionucléides d'origine artificielle de longue période radioactive, tels que le ^{137}Cs , le ^{90}Sr mais aussi les transuraniens ($^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu et ^{241}Am). Les carottages des sols permettent d'évaluer la migration de ces radionucléides vers la profondeur des sols plusieurs dizaines d'années après les dépôts. En complément, des mesures in situ de l'activité surfacique du ^{137}Cs (Bq/m^2 estimés par spectrométrie gamma) et du débit de dose dans l'air ($\mu\text{Sv}/\text{h}$) ont été effectuées. L'activité des sols sera examinée à différentes échelles d'observation.

Par exemple, pour les sites de haute altitude comme les prairies du Mercantour, il s'agit de confirmer la présence de « points-chauds », petites surfaces où le ^{137}Cs provenant de l'accident de Tchernobyl et aussi le plutonium provenant des essais nucléaires sont fortement concentrés. De plus, toutes les mesures de l'activité des sols seront comparées entre elles dans le but d'identifier les sites les plus marqués par les radionucléides d'origine artificielle.

Sur chacune des zones étudiées, des prélèvements de prairie permanente ont été réalisés sur une parcelle représentative de la zone. Cette matrice constitue un bio-indicateur³ emblématique de la rémanence des dépôts de radioactivité artificielle, car les végétaux des prairies intègrent une partie des produits de fission présents dans les sols (^{137}Cs et ^{90}Sr). En complément, le lait et le fromage provenant des troupeaux qui broutent la prairie ont également été prélevés. Enfin, le sol des parcelles de prairie est échantillonné en complément. Dans les zones de production de fromages fermiers (Vosges, Alpes et Pyrénées), le sol, les végétaux de la prairie, le lait et le fromage ont été prélevés dans la même ferme. Dans le Jura, où le comté est produit dans une coopérative, le fromage a été prélevé à la coopérative de production et le sol, les végétaux de la prairie et le lait ont été échantillonnés dans une des fermes de la coopérative. Dans les zones de forêt, la rémanence des retombées anciennes est souvent plus importante.

En effet, le ^{137}Cs y est recyclé par la végétation forestière maintenant une activité toujours disponible dans la litière et le sol de surface, notamment pour les denrées forestières (champignons, baies et gibiers) qui témoignent, plusieurs dizaines d'années après les dépôts, de niveaux importants d'activité en ^{137}Cs . Outre les échantillons de champignons et de baies prélevés par l'IRSN, des échantillons de gibiers ont été fournis par les fédérations départementales des chasseurs de Haute-Corse, des Vosges et des Alpes-Maritimes.

Résultats attendus

Les données acquises au terme du constat, prévu début 2016, doivent permettre d'estimer la rémanence des radionucléides d'origine artificielle dans les sols, leurs transferts aux végétaux de la prairie et de la forêt ainsi qu'aux matrices d'origine animale, sur les différentes zones d'étude. Les données obtenues doivent permettre d'évaluer et de comparer le transfert des produits de fission (^{137}Cs et ^{90}Sr) dans la chaîne sol/végétaux de prairie/lait/fromage des différentes zones de prairie étudiées. Par ailleurs, des estimations de la dose d'ingestion liée à la consommation des denrées et de la dose externe seront proposées sur la base de l'activité mesurée dans les échantillons et du débit de dose mesuré sur les sites, respectivement. En particulier, l'exposition externe provenant de la radioactivité d'origine artificielle sera comparée aux autres composantes de l'exposition externe (rayonnement tellurique et cosmique).

3. Les végétaux de la prairie constituent des bioindicateurs de la rémanence de la radioactivité artificielle car le suivi de ce type d'échantillons permet d'étudier l'évolution de l'activité au fil du temps.

2.4. GAMME DES DOSES LIÉES AU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS

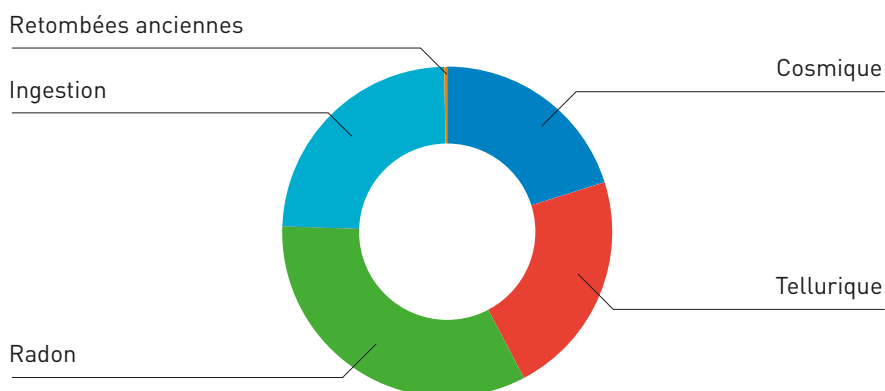
Les doses liées au bruit de fond radiologique français sont très variables en fonction du lieu de résidence (accumulation de radon dans l'air, rayonnement tellurique) et du mode de vie (consommation de fruits de mer, tabagisme, voyages en avion).

La figure 16 présente les doses pour deux cas très différents : celui d'une personne parmi les moins exposées de la population française et celui d'une personne qui cumule de par son lieu de résidence et son mode de vie, des expositions plus importantes au radon, à l'ingestion de radionucléides naturels, ainsi que des expositions liées à des voyages en avion et au tabagisme.

FIGURE 16 / DOSES EFFICACES LIÉES AUX RAYONNEMENTS NATURELS POUR 2 SITUATIONS D'EXPOSITION DIFFÉRENTES (mSv/an)
Extrait du rapport IRSN 2015-00004 « Exposition de la population française aux rayonnements ionisants »

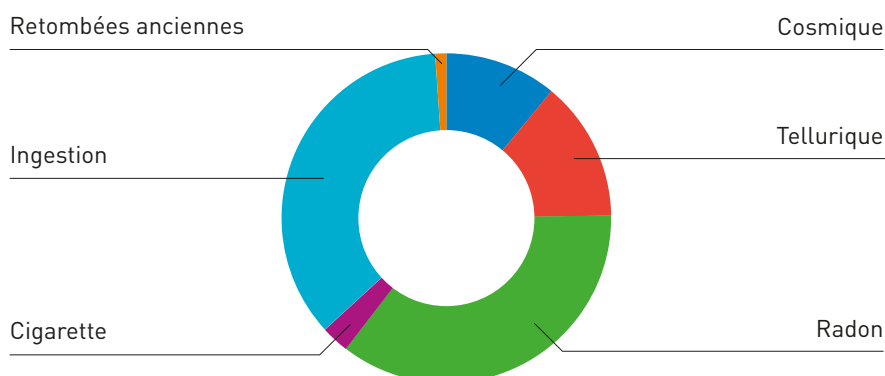
CAS 1 : 1,6 mSv/an

Adulte vivant dans une commune à faible teneur en radon et à faible niveau de rayonnements telluriques, peu touchée par les retombées anciennes, consommant peu de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et ne fumant pas



CAS 2 : 8,6 mSv/an

Adulte vivant dans une commune à forte teneur en radon et niveau élevé de rayonnements telluriques, fortement touchée par les retombées anciennes, fumant beaucoup, ayant une consommation importante de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et voyageant fréquemment en avion





Analyse du radium par émanométrie

© DR



© DR

CNPE de Paluel

/ BILAN DE L'ÉTAT RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS DE JUIN 2011 À DÉCEMBRE 2014



03

DONNÉES RELATIVES AUX DIFFÉRENTS SITES NUCLÉAIRES FRANÇAIS

3.1. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE (CNPE) EN EXPLOITATION	64
3.2. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE EN COURS DE DÉMANTÈLEMENT	82
Le site de Creys-Malville	82
Le site de Brennilis	87
3.3. LES SITES INDUSTRIELS	90
Le site de Malvési	90
Le site du Tricastin	96
Le site de Romans-sur-Isère	106
Le site de La Hague	112
Le centre de stockage de l'Aube et le centre de stockage de Morvilliers	140
3.4. LES SITES DE RECHERCHE	148
Le site de Marcoule	148
Le site de Valduc	164
Le site de Cadarache	174
Le site de Grenoble	178
Le site de Bruyères-le-Châtel	184
Le site de Saclay	188
Le site de Fontenay-aux-Roses	198
3.5. LES BASES NAVALES NUCLÉAIRES	204
3.6. LES ANCIENS SITES MINIERS	210
3.7. SYNTHÈSE DES ÉVALUATIONS DOSIMÉTRIQUES	216

03

DONNÉES RELATIVES AUX DIFFÉRENTS SITES NUCLÉAIRES FRANÇAIS

3.1. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE (CNPE) EN EXPLOITATION

19 centrales nucléaires sont actuellement exploitées en France par EDF. Chaque CNPE comporte de 2 à 6 réacteurs pour un total de 58 réacteurs : 34 réacteurs d'une puissance unitaire de 900 MWe, 20 réacteurs de 1 300 MWe et 4 réacteurs de 1 450 MWe.

Les rejets

Le fonctionnement d'une centrale nucléaire entraîne la production d'effluents radioactifs liquides et gazeux. Conformément à la réglementation, chaque CNPE dispose d'une autorisation spécifique encadrant les conditions de rejet des substances radioactives dans l'air et dans l'eau du fleuve ou de la mer en bord duquel il est implanté. Ces conditions de rejets permettent d'assurer que dans toutes les conditions, y compris les plus pénalisantes, l'exposition du public reste inférieure à 1 mSv/an. Mais les rejets réels sont inférieurs, voire très inférieurs à ces limites. Les tableaux 1 et 2 présentent les gammes (minimum et maximum) des rejets atmosphériques et liquides réels par site en fonction du nombre et de la puissance des réacteurs qui y sont implantés.

Outre les gaz rares (xénon, argon et surtout krypton, qui se trouvent exclusivement dans l'air et ne sont pas transférés dans les autres composantes de l'environnement), le tritium et le carbone 14 sont de loin les radionucléides les plus abondants dans les rejets aussi bien atmosphériques que liquides.



CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux

© EDF/Médiathèque

Les plans de surveillance de l'environnement d'un CNPE

Pour chacun des CNPE en exploitation et pour les sites où des réacteurs sont en cours de déconstruction (cf. figure 1), EDF effectue une surveillance des rejets à la source d'une part, et une surveillance radiologique de l'environnement à proximité des sites d'autre part. Dans ce qui suit, seuls les dispositifs de surveillance environnementale sont présentés. Le tableau 3 fournit un exemple d'obligations réglementaires concernant les CNPE (cf. tableau 3 ; cf. chapitre 1 pour la présentation générale des dispositifs de surveillance). EDF a ainsi produit sur l'année 2013 entre 1840 et 2880 résultats de mesures de radioactivité de l'environnement de chacun des CNPE, soit un total de 50 900 résultats.

FIGURE 1 / LOCALISATION DES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ (CNPE) D'EDF EN EXPLOITATION, EN COURS DE DÉMANTÈLEMENT OU EN CONSTRUCTION, NOMBRE ET PUISSANCE DES RÉACTEURS EN EXPLOITATION

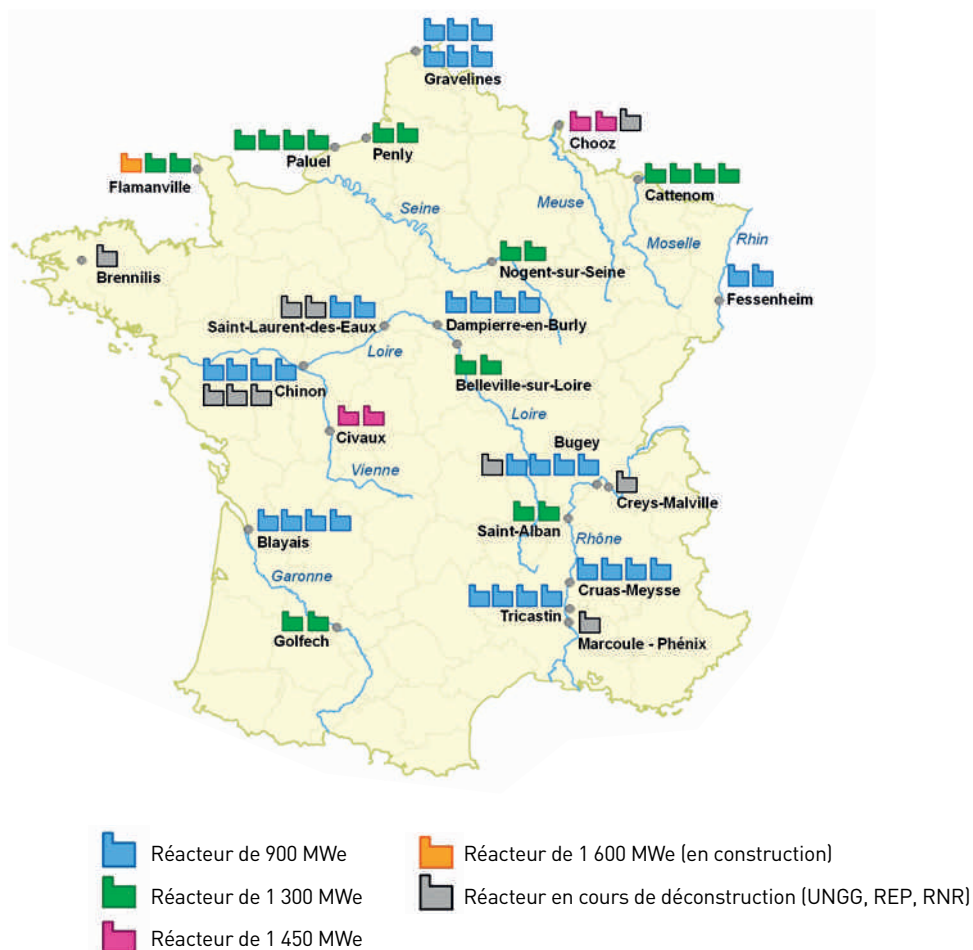


TABLEAU 1 / ORDRE DE GRANDEUR DES REJETS ANNUELS RÉELS ATMOSPHÉRIQUES (MIN ET MAX) (GBq/an) EN FONCTION DU NOMBRE ET DE LA PUISSANCE DES RÉACTEURS IMPLANTÉS SUR CHAQUE SITE

	Gaz rares	Tritium	Carbone 14	Iodes	Autres PF/PA*
Gravelines	1 800-5 400	1 200-2 400	780-900	0,054-0,21	0,012-0,024
Cattenom • Paluel	1 200-8 800	3 200-6 800	800-880	0,084-0,48	0,008-0,016
Bugey • Cruas-Meyssse • Chinon Dampierre • Tricastin • Le Blayais	1 200-3 600	800-1 600	520-600	0,036-0,14	0,008-0,016
Civaux • Chooz	600-4 600	400-1 600	420-540	0,02-0,64	0,004-0,012
Belleville • Flamanville • Golfech Nogent • Penly • Saint-Albans	600-4 400	1 600-3 400	400-440	0,042-0,24	0,004-0,008
Fessenheim • Saint-Laurent	600-1 800	400-800	260-300	0,018-0,07	0,004-0,008

* Produits de fission (PF) et produits d'activation (PA), principalement : les cobalt 58 et 60, les césium 134 et 137 et l'argent 110m

L'IRSN réalise également, dans le cadre de ses missions, une surveillance autour des CNPE d'EDF (cf. tableau 3-A). À ce titre 29 700 résultats d'analyses ont été produits par l'IRSN en 2013 pour l'environnement des CNPE. La majeure partie de ces résultats concerne l'air et l'eau qui sont les milieux récepteurs des rejets. Il s'agit de répondre à l'objectif prioritaire de la surveillance qui est de déceler de manière précoce toute anomalie ou rejet intempestif et de vérifier que l'exploitant respecte les conditions de rejets (cf. chapitre 1). Ainsi, les mesures d'indice d'activité bêta global réalisées quotidiennement sur des filtres atmosphériques représentent de l'ordre de 65 à 80 % des résultats acquis par EDF. De l'ordre de 30 % des résultats produits par EDF concernent le milieu aquatique continental (rivière ou fleuve), 8 %, le milieu marin pour les CNPE de bord de mer et 4 % concernent le milieu terrestre. La plus faible proportion d'analyses consacrées aux matrices biologiques, notamment les denrées en milieu terrestre, résulte en partie du fait que les rejets des CNPE hors tritium et carbone 14 sont

trop faibles pour que leur influence soit décelable dans ces composantes avec les techniques utilisées pour la surveillance réglementaire.

Afin de compléter cette surveillance, EDF a mis en place depuis 25 ans une surveillance spécifique autour des CNPE ainsi que des bilans décennaux, qui sont réalisés par l'IRSN et SUBATECH. Le tableau 3-B présente les prélèvements et analyses réalisés dans ce cadre. L'utilisation de techniques métrologiques plus performantes ainsi que le recours à des indicateurs biologiques (cf. BR 2012) permet de déceler de nombreux radionucléides dans le compartiment aquatique, ainsi que le tritium et le carbone 14 dans le compartiment terrestre. Pour les autres radionucléides, les teneurs dans les denrées terrestres sont trop faibles pour être mesurées même au moyen des meilleures techniques disponibles, à l'exception du césium 137 rémanent, issu des retombées de l'accident de Tchernobyl ou de celles des essais atmosphériques d'armes nucléaires (cf. chapitre 2).

TABLEAU 2 / GAMME DE REJETS ANNUELS RÉELS LIQUIDES (MIN ET MAX) EN FONCTION DU NOMBRE ET DE LA PUISSANCE DES RÉACTEURS IMPLANTÉS SUR CHAQUE SITE (GBq/an)

	Tritium	Carbone 14	Iodes	Autres PF/PA*
Gravelines	60 000-72 000	60-66	0,03-0,054	1,2-1,8
Cattenom • Paluel	96 000-116 000	60-64	0,024-0,036	2,4-3,6
Bugey • Cruas-Meysses • Chinon Dampierre • Tricastin • Le Blayais	40 000-48 000	40-44	0,02-0,36	0,8-1,2
Civaux • Chooz	26 000-64 000	30-32	0,012-0,018	0,4-0,6
Belleville • Flamanville • Golfech Nogent • Penly • Saint-Albans	48 000-58 000	30-32	0,012-0,018	1,2-1,8
Fessenheim • Saint-Laurent	20 000-24 000	20-22	0,01-0,018	0,4-0,6

* Produits de fission (PF) et produits d'activation (PA), principalement : les cobalt 58 et 60, les césium 134 et 137 et l'argent 110m

TABLEAU 3-A / PLANS-TYPE DE LA SURVEILLANCE RÉALISÉE PAR EDF (SURVEILLANCE RÉGLEMENTAIRE) ET PAR L'IRSN AUTOUR DES CNPE

Milieu surveillé ou nature du contrôle	EDF	IRSN
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> • 4 points de prélèvements et mesures quotidiennes de l'activité β-global sur filtre • Spectrométrie γ si valeurs $> 2 \text{ mBq/m}^3$ • 1 mesure hebdomadaire de tritium (^3H) sous vent dominant 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 station de prélèvement en continue d'aérosols à $80 \text{ m}^3/\text{h}$ avec spectrométrie gamma à une fréquence hebdomadaire
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> • 10 balises en bordure de site • 4 balises à 1 km et 4 balises à 5 km 	<ul style="list-style-type: none"> • Jusqu'à 16 balises Télecay dans un rayon de 10 à 30 km autour du site
Pluie	<ul style="list-style-type: none"> • 1 mesure mensuelle β-global et ^3H 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 mesure mensuelle ^3H
Milieu récepteur des rejets liquides	<ul style="list-style-type: none"> • 1 mesure β-global sur matières en suspension et 1 mesure ^3H à mi-rejet pour CNPE fluvial ou après dilution dans eau de refroidissement et bi-mensuel en mer pour CNPE marin 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 mesure mensuelle par spectrométrie γ sur matières en suspension. • 1 mesure ^3H dans l'eau à mi-rejet pour CNPE fluvial ou après dilution dans eau de refroidissement pour CNPE marin (complétée d'analyses alpha, U, Sr, α_{global}, β_{global} une fois / an et par bassin versant) • 1 prélèvement de poisson annuel pour analyse ^3H, ^{14}C et spectrométrie γ
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> • 5 points de prélèvement et mesures mensuelles du β-global et ^3H 	
Sol	<ul style="list-style-type: none"> • 1 prélèvement annuel avec spectrométrie gamma 	
Végétaux	<ul style="list-style-type: none"> • 1 point de prélèvement d'herbe et mesures mensuelles β-global, et spectrométrie γ • Mesure trimestrielle de ^{14}C et C total • Campagne annuelle sur les productions agricoles avec mesures β-global, spectrométrie gamma et ^{14}C 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 prélèvement de légume-feuille pour analyse ^3H, ^{14}C et spectrométrie γ • 1 prélèvement annuel de céréales pour analyse ^{14}C et spectrométrie γ
Lait	<ul style="list-style-type: none"> • 2 points de prélèvement pour mesures mensuelles β-global, ^{40}K et annuellement C 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 prélèvement de lait semestriel pour analyse ^3H et spectrométrie γ



Pêche sur la Garonne en aval du CNPE de Golftech

TABLEAU 3-B / PLAN GÉNÉRIQUE DE PRÉLÈVEMENTS ET D'ANALYSES DU SUIVI ANNUEL RÉALISÉ PAR L'IRSN ET SUBATECH POUR LE COMPTE D'EDF

Milieu	Matrices	Analyses				
		Spectrométrie γ	Tritium		Carbone 14	Iode 131
			libre	lié		
Terrestre	Mousses et/ou lichens	2				2
	Herbe de prairie	1			1	
	Légumes-feuilles	1				
	Lait de vache ou de chèvre	1	1	1		
	Sol non cultivé	1				
	Eau potable (AEP)		1			
Aquatique continental	Sédiments	3				
	Mousses et plantes aquatiques	5				2
	Poissons	2	2	2	2	
Marin	Sédiments	3				
	Algues	3				3
	Arthropodes	2	2			
	Mollusques	2	2	2	2	
	Poissons	2				

Influence des CNPE sur leur environnement et expositions du public associées

En raison de leur importance relative dans les activités rejetées et de leur comportement, le carbone 14 et le tritium sont les deux radionucléides pour lesquels l'influence des CNPE est la plus visible dans l'environnement, plus particulièrement dans le milieu aquatique continental ; ce sont les deux principaux contributeurs potentiels à l'exposition de la population résidant à proximité de ces installations.

• Le carbone 14

Les rejets de carbone 14 en milieu aquatique conduisent à une augmentation de l'activité dans les poissons des cours d'eau. Cette augmentation est visible en termes d'activité massique (en Bq/kg frais) et par son expression en Bq/kg de carbone stable (Bq/kg C ; voir le focus p. 71-72). Hors influence des installations nucléaires, l'activité massique en ^{14}C des poissons est de l'ordre de 25 Bq/kg frais. Les mesures obtenues dans le cadre des suivis radioécologiques réalisés à l'initiative d'EDF en complément de la surveillance réglementaire, montrent que l'activité en carbone 14 dans les poissons des cours d'eau français soumis aux rejets des CNPE est très variable. Elle est de 25 Bq/kg frais en aval de Fessenheim, 45 à 60 Bq/kg au fil de la Loire, 30 à plus de 100 Bq/kg dans le Rhône aval, ainsi qu'en aval des CNPE de Civaux, Chooz, Nogent et Cattenom. L'activité moyenne ajoutée par un CNPE d'EDF est de l'ordre de 40 Bq/kg frais. Une personne qui consommerait 5,3 kg/an de poissons¹ présentant une activité égale à cette dernière valeur, recevrait une dose ajoutée de 0,12 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette dose se trouve dans la gamme de celles évaluées par EDF par calcul sur la base des activités de ^{14}C rejetées : entre 0,04 et 0,17 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette dose liée au rejet liquide de ^{14}C , la plus importante qui puisse résulter du fonctionnement normal d'un CNPE, ne représenterait que 1 % de la dose de 12 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ liée à l'incorporation des radionucléides naturels liée à cette consommation de poissons de rivière (cf. figure 2).

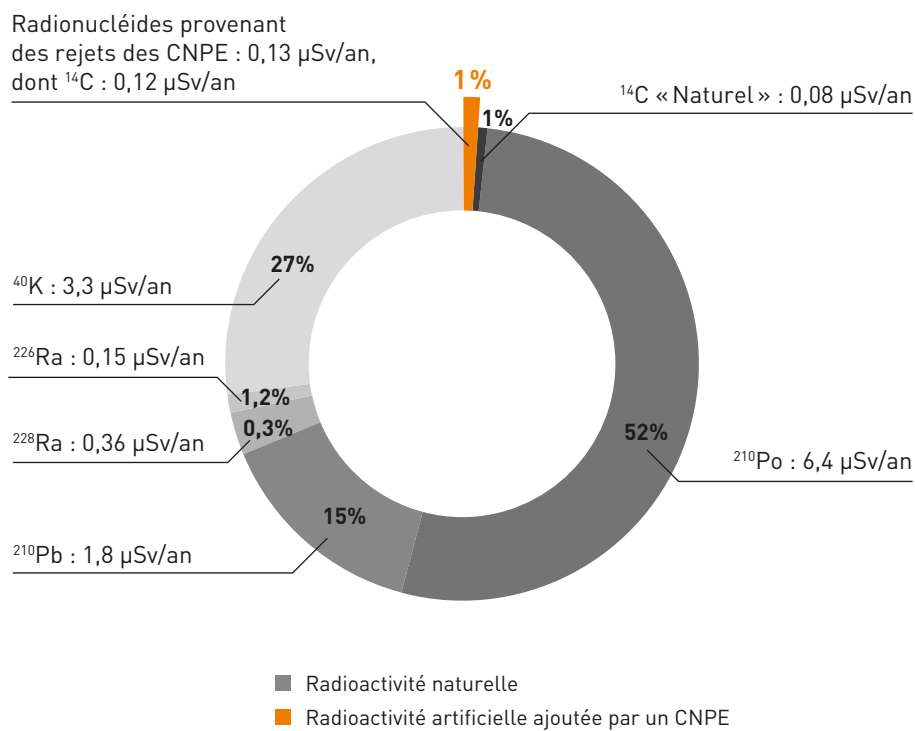
L'influence des rejets atmosphériques de carbone 14 dans l'air autour des CNPE est extrêmement discrète. Elle n'a pu être quantifiée dans les échantillons de l'environnement terrestre qu'en comparant des résultats acquis sur de nombreux échantillons prélevés sous et hors vents dominants. Les rejets atmosphériques de ^{14}C conduisent à une augmentation moyenne de 1 % des activités massiques dans toutes les composantes du milieu terrestre et notamment dans les denrées produites localement. Une personne qui se nourrirait exclusivement de denrées dont l'activité moyenne serait augmentée de 1 %, recevrait une dose de 0,1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette dose n'est en pratique jamais atteinte car si la consommation de productions locales peut être importante pour certaines catégories de denrées (légumes et fruits notamment), elle est en général très faible pour les denrées les plus riches en carbone (sucre, céréales) ainsi que le lait, les produits laitiers et la viande.

• Le tritium

L'essentiel du tritium présent dans le milieu fluvial en aval des CNPE provient des rejets liquides de ces installations. La rémanence des essais atmosphériques d'armes nucléaires et la production naturelle de tritium cosmogénique (cf. chapitre 2) conduit à un « bruit de fond radiologique » de l'ordre de 1 à 3 Bq/L. Ces dernières années, les activités moyennes mesurées dans l'eau en aval des CNPE vont de moins de 4 à 9 Bq/L dans le Rhône et le canal d'Alsace, de 5 à 35 Bq/L dans la Garonne, la Loire, la Vienne, la Meuse, la Moselle et la Seine, avec des fluctuations annuelles importantes dans ce dernier fleuve (les moyennes annuelles de 2006 et 2011 y ont dépassé 50 Bq/L ; cf. figures 3, 4, 5, 6 et 7). Ces valeurs sont liées aux rejets de chaque site, au débit du cours d'eau et donc à sa capacité à diluer les rejets, ainsi que, pour les sites situés en aval d'autres sites, à un effet de cumul.

1. Cette valeur est proposée par l'InVS-ANSES et l'AFSSA. Du fait de problèmes de contamination chimique indépendant des installations nucléaires (PCB notamment), la pêche et la consommation de poissons des cours d'eau concernés est souvent interdite. Cela réduit d'autant la probabilité d'occurrence de ce scénario.

FIGURE 2 / DOSE DUE À LA CONSOMMATION DE POISSONS DE RIVIÈRE PÊCHÉS EN AVAL DE CNPE : CONTRIBUTION DES DIFFÉRENTS RADIONUCLÉIDES NATURELS ET ARTIFICIELS À LA DOSE TOTALE ESTIMÉE À 12 µSv/an RÉSULTANT D'UNE CONSOMMATION DE 5,3kg/an DE POISSONS



Poisson (silure) pêché dans du Rhône

© DR

FOCUS CARBONE 14 DANS LES POISSONS D'EAU DOUCE

En milieu aquatique, le carbone se répartit entre diverses molécules de carbone organique (provenant des organismes vivants et morts) et le carbone minéral, essentiellement sous la forme de carbonates dissous.

Contrairement au milieu terrestre (*cf.* chapitre 2) l'activité du carbone 14 dans l'eau n'est pas en équilibre avec le CO₂ atmosphérique et est influencée, entre autres, par les concentrations du carbone stable dissous, notamment les carbonates. La teneur en carbonates varie d'un fleuve à l'autre, ainsi qu'au sein d'un même bassin versant et selon les affluents et la saison : par exemple le Rhône français présente une teneur en carbonates variant d'un facteur 2 à 3 entre l'amont et l'aval. Ces carbonates, issus des roches, ne contiennent plus de carbone 14 qui a disparu par décroissance radioactive. De ce fait, l'activité du carbone 14 des différents compartiments du milieu aquatique est plus ou moins amoindrie et variable par rapport à celle, constante à l'échelle de l'année, observée en milieu terrestre (232 Bq/kg C¹ en 2012, dans tous les compartiments, hors sols et bois d'arbres).

L'IRSN a montré que le carbone 14 mesuré dans les poissons prélevés en tête de bassins (non soumis à un rejet liquide contemporain), variait de 199 à 238 Bq/kg C (valeur moyenne : 219 Bq/kg C) pour des échantillons prélevés de 2007 à 2012. Par rapport à ce « bruit de fond », les résultats des mesures de poissons prélevés dans le cadre des études faites à la demande d'EDF (suivi radioécologique annuel) en supplément de la surveillance réglementaire, montrent qu'il y a une augmentation de l'activité du carbone 14 des poissons prélevés dans les fleuves où ont lieu des rejets liquides des CNPE (*cf.* figure A).

Cette augmentation est le plus souvent, mais pas toujours, observable sur les échantillons prélevés à l'aval des rejets par rapport à l'amont, et de l'amont vers l'aval des fleuves lorsqu'ils comportent plusieurs CNPE. Les valeurs mesurées sont très variables suivant le site et l'année.

FIGURE A / CARBONE 14 DANS LES POISSONS (MUSCLES) EN Bq/kg C (VALEURS 2013)



1. Il s'agit de l'activité spécifique en Bq/kg de carbone qui est un indicateur beaucoup plus sensible que l'activité massique (Bq/kg frais) de tout ajout de contamination (*cf.* chapitre 2).



La variabilité observée est imputable à de multiples facteurs qui dépendent des caractères propres au bassin versant considéré ainsi qu'aux particularités de l'échantillon en particulier :

- présence ou absence d'une succession d'installations procédant à des rejets ;
- présence ou absence d'un affluent susceptible d'augmenter la dilution ;
- bassin versant plus ou moins susceptible d'alimenter le fleuve en matières organiques anciennes « enrichies » par les retombées des essais militaires atmosphériques ;
- présence de carbonates diminuant le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}$;
- caractéristiques physicochimiques des sédiments et des matières en suspension qui sont des facteurs de variation de l'incorporation par la chaîne alimentaire ;
- lieu de vie incertain du lot de poissons. Les poissons se déplacent de plusieurs km, ce qui fait qu'un poisson pêché à l'aval d'un rejet peut avoir vécu plus ou moins longtemps à l'amont, et vice-versa. De plus, les rejets d'eaux tièdes sont une zone attractive pour les poissons qui ont tendance à s'approcher de la zone de rejets ;
- caractéristiques écologiques et âge du lot de poissons (qui influent sur leur alimentation).

Pour ces raisons, il est peu pertinent d'attribuer une valeur moyenne pour tous les CNPE, à la différence d'activité des poissons dits « amont » ou « aval » de chaque site. En revanche, une estimation globale peut être faite (cf. tableau A), en considérant :

- le bruit de fond moyen en tête des bassins (219 Bq/kg C) ;
- la moyenne des échantillons prélevés qu'ils soient référencés comme « amont » ou « aval » ;
- la différence entre ces deux valeurs, qui traduit l'augmentation moyenne de l'activité des poissons en carbone 14 sur les cours d'eau français, soit une quarantaine de becquerels par kilogramme frais sur la période 2008-2013 pour le territoire dans son ensemble.

TABLEAU A / AUGMENTATION MOYENNE DU NIVEAU D'ACTIVITÉ EN CARBONE 14 DES POISSONS PÊCHÉS DANS LES COURS D'EAU RÉCEPTEURS DES REJETS LIQUIDES DES CNPE PAR RAPPORT AU BRUIT DE FOND NATUREL ET RÉMANENT (2008-2013)

Période de prélèvements	Nombre d'échantillons	Bq/kg C total, tous échantillons	Bq/kg C, hors bruit de fond naturel et rémanent (=220 Bq/kg C)	Bq/kg frais ajoutés en moyenne par les CNPE
2008-2013	160	574	355	40

Conséquences en termes de dose

La consommation de poissons d'eau douce, lorsqu'elle est possible (fréquentes interdictions de pêche et/ou de consommation dans les grands fleuves en raison de pollutions chimiques non imputables aux activités nucléaires), est faible : selon les données de l'InVS-ANSES² et de l'AFSSA³, la consommation moyenne de l'adulte peut être évaluée à 1,3 kg/an (environ une fois par mois, portion de 100 g par repas) ; les gros consommateurs qui représentent 5 % de la population, peuvent en consommer un peu plus d'une fois par semaine, soit environ 5,3 kg/an.

Pour la période 2008-2013, la teneur moyenne des poissons en ^{14}C est de 70 Bq/kg frais dont 60 % (40 Bq/kg frais) sont en moyenne liés aux rejets des REP. La dose efficace qui résulte de la consommation de ces poissons varie de : 0,05 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (dont 0,02 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ sont liés au bruit de fond) pour les consommateurs moyens à 0,2 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (cf. figure 2). Dans ce dernier cas, 0,08 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ sont liés au bruit de fond radiologique, la part due aux rejets des CNPE étant donc de 0,12 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (cf. figure 2).

2. Étude InVS-ANSES - étude nationale d'imprégnation aux polychlorobiphényles (PCB) des consommateurs de poissons d'eau douce (ICAR-PCB 2011 - n° 2008-SA-0416) nov. 2011.

3. Avis de l'AFSSA du 14 juin 2010 relatif aux bénéfices / risques liés à la consommation de poissons Avis scientifique, 2010-06-14, p. 1-31.

FIGURE 3 / ACTIVITÉS MOYENNES ANNUELLES EN TRITIUM DES EAUX DE LA LOIRE EN AVAL DES CNPE D'EDF (Bq/L)

Les chroniques d'activités moyennes annuelles en tritium mesurées par l'IRSN depuis les années 1980 dans les eaux de la Loire mettent en évidence la baisse de l'activité du tritium rejeté par les CNPE d'EDF. On note également un effet de cumul assez marqué à Chinon jusqu'en 2000. Après 2000, les activités moyennes annuelles fluctuent moins d'une année sur l'autre et l'effet de cumul à Chinon s'estompe. Ce « lissage » peut résulter en partie d'une concertation désormais préalable aux rejets : le CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux coordonne les rejets de l'ensemble des CNPE rejetant dans ce fleuve et, sauf dérogation, deux rejets ne peuvent être réalisés simultanément. Les conditions climatiques sévères en mai-juin 2011, avec un déficit pluviométrique important, ont conduit à une augmentation de l'activité en tritium dans le fleuve qui n'avait pas été observée depuis 1996. Ces activités restent conformes aux autorisations de rejets imposées aux exploitants.

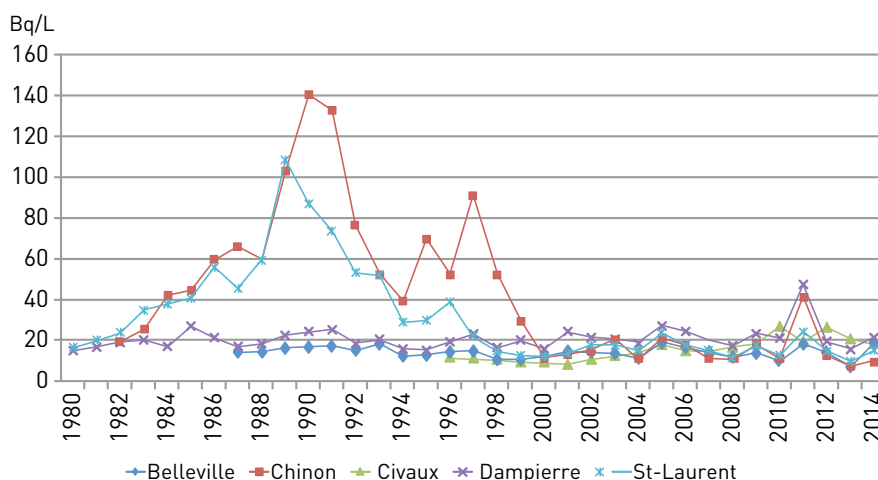


FIGURE 4 / ACTIVITÉS MOYENNES ANNUELLES EN TRITIUM DES EAUX DE LA MEUSE, DE LA MOSELLE, DU CANAL D'ALSACE ET DE LA SEINE EN AVAL DES CNPE DE CHOOZ, CATTENOM, FESSENHEIM ET NOGENT (Bq/L)

L'arrêt définitif de l'exploitation du CNPE de Chooz-A en 1991 a entraîné une forte baisse de l'activité en tritium dans la Meuse au début des années 1990, passant de 40 Bq/L à 10 Bq/L en moyenne annuelle (courbe bleue). Depuis le milieu des années 1990, cette activité en tritium de la Meuse est en légère mais constante augmentation pour atteindre 30 Bq/L en 2011 et 27 Bq/L en 2014. L'activité moyenne dans la Moselle en aval du CNPE de Cattenom est également en constante augmentation, passant de 15 Bq/L en 1985 à 36 Bq/L en 2014. En revanche, l'activité moyenne annuelle en tritium en aval du CNPE de Fessenheim décroît régulièrement depuis 1976. L'amélioration des performances métrologiques permet à l'IRSN de mesurer à nouveau le tritium dans l'eau du Rhin depuis 2008, à des niveaux inférieurs à 5 Bq/L. Le marquage en tritium de l'eau de la Seine prélevée en aval du CNPE de Nogent-sur-Seine est caractéristique du fonctionnement de l'installation ; l'activité moyenne mesurée en 2014 dans la Seine est de 26 Bq/L.

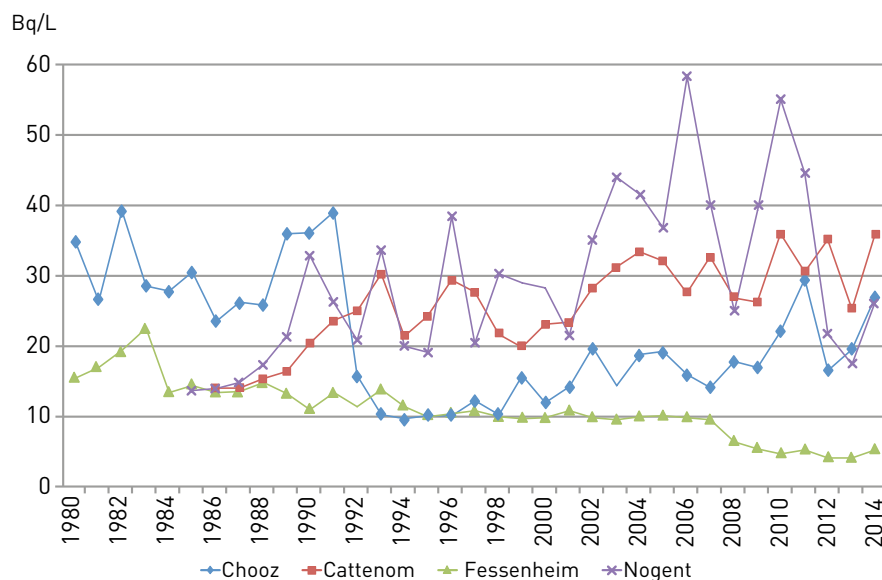


FIGURE 5 / ACTIVITÉS MOYENNES ANNUELLES EN TRITIUM DES EAUX DE LA GARONNE EN AVAL DU CNPE DE GOLFECH ET DE LA GIRONDE EN AVAL DE CELUI DE BLAYAIS (Bq/L)

L'implantation de l'hydrocollecteur de l'IRSN situé en aval du CNPE du Blayais a changé en 2007. Initialement installé à Laspeyres, il a été rapproché de l'exutoire du CNPE, expliquant ainsi la hausse de l'activité. Depuis 2007, les prélèvements réalisés directement dans le canal de rejets du CNPE montrent des activités en tritium de 5 à 40 Bq/L qui, après dilution dans l'estuaire, ne sont en général plus détectables à Vitrezay ou à Pauillac. Ces activités sont en constante diminution et ont été divisées par 3 depuis 1981. L'activité du tritium mesurée dans l'eau de la Garonne en aval de Golfech est également en diminution constante depuis la fin des années 80 (baisse de la rémanence des essais nucléaires). L'activité moyenne mesurée en 2014 est de 5 Bq/L.

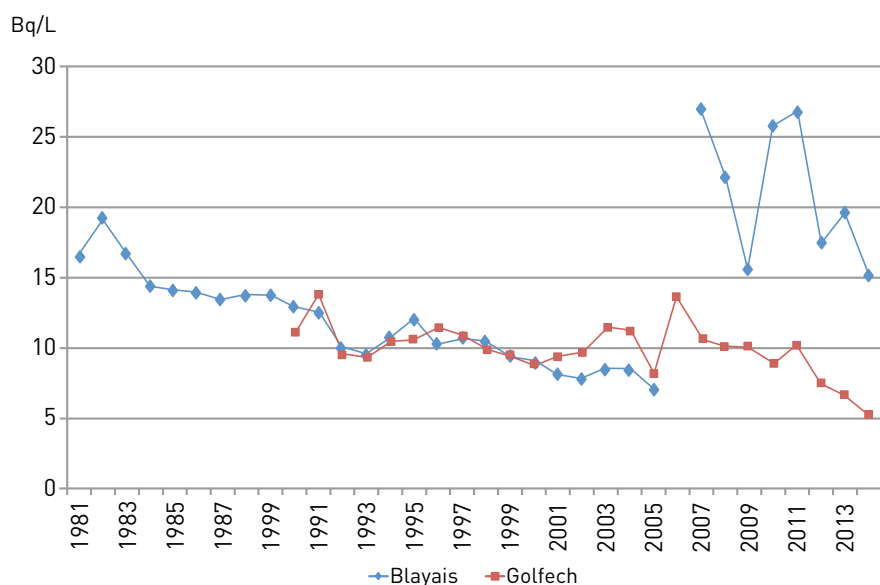


FIGURE 6 / ACTIVITÉS MOYENNES ANNUELLES EN TRITIUM DES EAUX DU RHÔNE EN AVAL DES CNPE DE CREYS, BUGEY, SAINT-ALBAN, CRUAS ET TRICASTIN (Bq/L)

Depuis le début des années 80, l'activité en tritium des eaux du Rhône en aval des CNPE a diminué de 3 à 4 fois (baisse de la rémanence des essais nucléaires). Des activités de plus en plus souvent inférieures à 10 Bq/L ont amené l'IRSN à améliorer ses performances métrologiques en 2008-2010 de manière à permettre la mesure d'activités toujours plus faibles et jusqu'à 1 Bq/L.

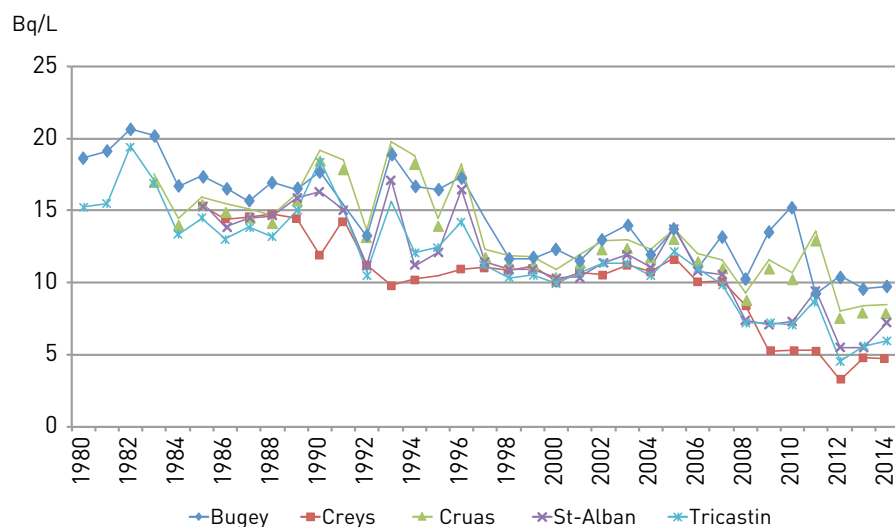
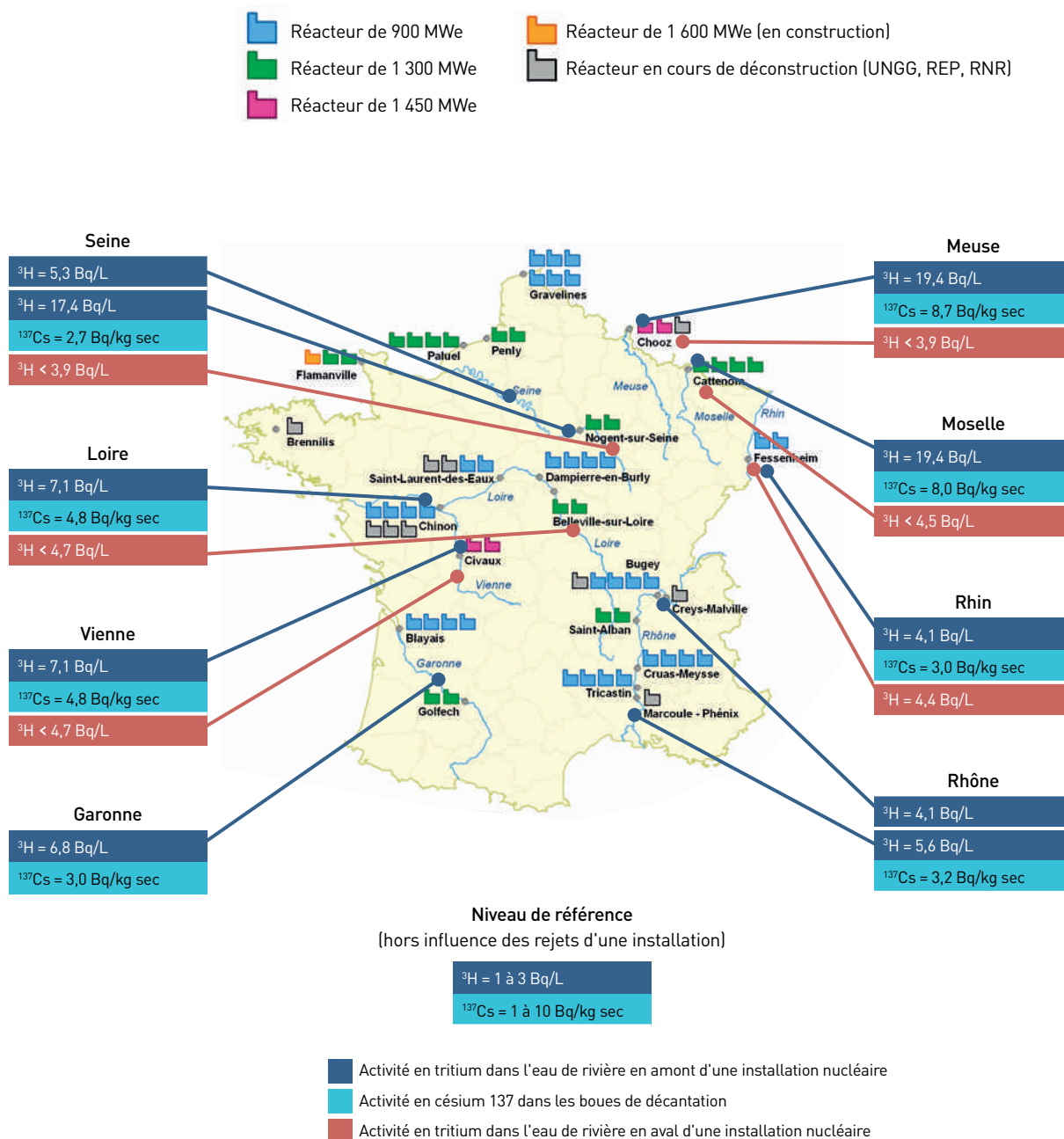


FIGURE 7 / ACTIVITÉS MOYENNES EN TRITIUM DES EAUX FLUVIALES (Bq/L) ET ACTIVITÉS EN CÉSIIUM 137 DES BOUES DE DÉCANTATION MESURÉES EN 2013 (Bq/kg sec)



Contrairement à la plupart des radionucléides rejetés par voie liquide, le tritium n'est pas arrêté par les traitements de potabilisation. Il en résulte que de l'eau de boisson consommée peut se trouver aux niveaux d'activité mesurés dans l'environnement aquatique. Les doses dues au tritium et consécutives à une consommation de 2 L d'eau/j aux activités mesurées seraient de l'ordre de 0,01 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ à 0,6 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Ces doses sont concordantes quoique inférieures à celles évaluées par EDF par calcul sur la base

des activités rejetées : de 0,01 à 2,3 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Des activités en tritium plus élevées mesurées par EDF sont reportées dans le Réseau National de Mesure. Il s'agit de mesures réalisées sur des prélèvements effectués au moment des rejets tels qu'exigés par la réglementation (cf. Prélèvement à mi-rejet du tableau 3-A). Très logiquement, les activités mesurées peuvent être en moyenne jusqu'à 6 fois supérieures à celles mesurées par l'IRSN par prélèvement continu tout au long de l'année (cf. tableau 4).

TABLEAU 4 / MOYENNE SUR LA PÉRIODE JUIN 2011-OCTOBRE 2014 DES ACTIVITÉS EN TRITIUM MESURÉES PONCTUELLEMENT DURANT LES REJETS PAR EDF ET EN CONTINU PAR L'IRSN (Bq/L)

CNPE	EDF	IRSN
Bugey	77	12
Cruas	31	12
Chooz	59	30
Nogent	60	40
Fessenheim	34	4,8
Chinon	47	37
Saint-Alban	58	7,9
Belleville	51	22
Dampierre	68	35
Saint-Laurent	39	26
Golfech	43	10
Cattenom	56	36
Tricastin	27	6,9
Civaux	57	32

Le tritium présent dans l'eau et de manière générale dans le milieu, est transféré aux poissons. Les rejets d'un CNPE conduisent à augmenter de l'ordre de 10 Bq/kg, l'activité en tritium des poissons de rivière. La dose liée à l'ingestion de 5 kg/an de poissons qui en résulterait (0,0012 μ Sv/an) est 100 fois plus faible que celle liée au carbone 14 ajouté par les CNPE ; elle est complètement négligeable dans la dose totale liée à la consommation de poissons de rivière ou celle liée à la consommation d'eau du robinet. Le tritium est également mesuré dans les nappes mais principalement à l'intérieur du site et les niveaux sont plus faibles que dans les cours d'eau. Des activités très légèrement supérieures au bruit de fond ont cependant été mesurées dans des eaux de boisson d'origine fluviale, notamment à Chinon avec une activité maximale de 6,8 Bq/L mesurée en 2013. Par ailleurs, suite à des dysfonctionnements ou à des incidents, les eaux de nappes phréatiques échantillonnées à l'intérieur des sites d'EDF peuvent présenter temporairement des marquages en tritium (cf. figures 8 et 9).

Lorsque le tritium peut être mesuré dans l'air, dans l'eau de pluie ou dans les denrées terrestres, l'influence des rejets atmosphériques des CNPE est difficilement discernable du tritium naturel ou rémanent des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Sur la période 2011-2014, une cinquantaine d'échantillons prélevés sur l'ensemble des sites d'EDF montre que, très sporadiquement, les eaux de pluie présentent des activités allant de 4 (proches du bruit de fond) à 11 Bq/L et jusqu'à 18 Bq/L autour du Tricastin. Les activités plus élevées observées autour de ce site dans l'eau de pluie ainsi que dans l'air — une

trentaine de mesures allant de 0,1 à 0,55 Bq/m³ et donc très supérieures au bruit de fond (de l'ordre de 0,01 Bq/m³) — sont probablement imputables aux rejets du centre de Marcoule situé à moins de 20 km au Sud. Les doses correspondantes liées à l'inhalation ou à l'ingestion sont tout à fait négligeables de manière générale et notamment au regard de celles potentiellement liées à la consommation d'eau et présentées précédemment.



Prélèvement de mousse sur un pont du Rhône

© DR

FIGURE 8 / ACTIVITÉS EN TRITIUM DANS LES EAUX SOUTERRAINES PRÉLEVÉES AU PIÉZOMÈTRE N15 SUR LE SITE DE GRAVELINES (Bq/L)

Fin 2013, la surveillance par l'exploitant des eaux souterraines prélevées au piézomètre N15 du CNPE de Gravelines a révélé une activité inhabituelle en ^3H de l'ordre de 200 Bq/L. Ce tritium trouve son origine dans le déversement accidentel de plusieurs litres d'effluents radioactifs (type KER) durant un chantier de rénovation de tuyauterie.

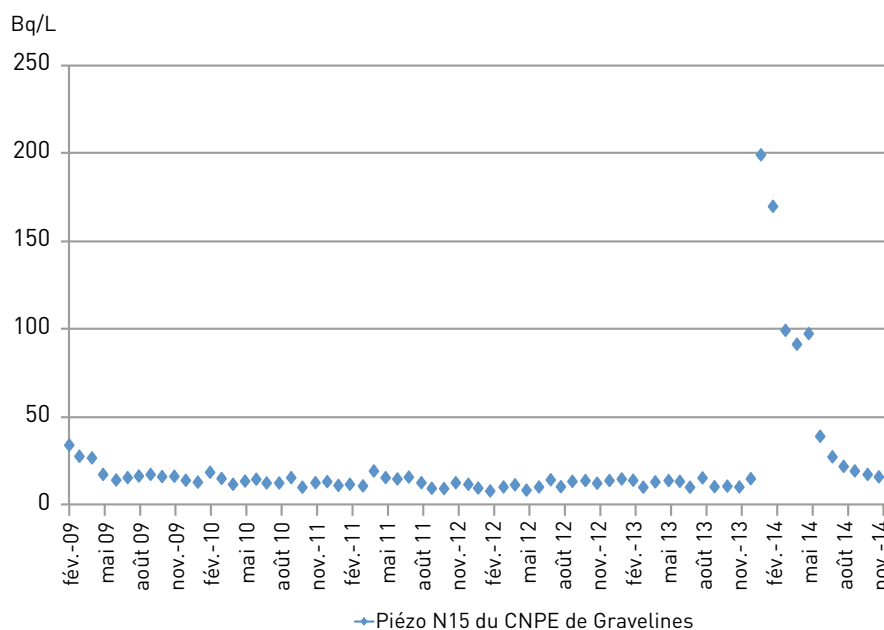
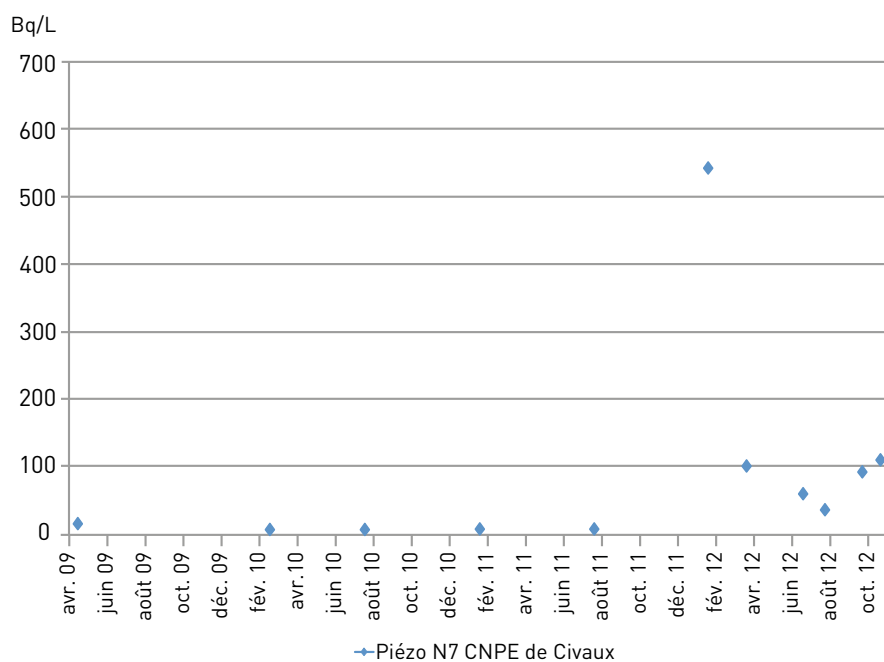


FIGURE 9 / ACTIVITÉS EN TRITIUM DANS LES EAUX SOUTERRAINES (Bq/L) PRÉLEVÉES AU PIÉZOMÈTRE N7 SUR LE SITE DE CIVAUX (Bq/L)

Une fuite d'effluents de type KER est également à l'origine d'un marquage en tritium observé fin 2011 dans les eaux prélevées dans le piézomètre N7 du CNPE de Civaux. Des marquages de même nature ont été observés sur le CNPE de Dampierre (jusque 1300 Bq/L à l'été 2012 sur les piézomètres 8, 18 et 33) et de Tricastin (jusque 140 Bq/L en septembre 2014 sur le piézomètre 45).



• **Les autres radionucléides**

En raison de quantités émises extrêmement faibles, les radionucléides émetteurs gamma, rejetés par voie atmosphérique par les CNPE sont difficiles à déceler et ne sont pratiquement jamais mesurés dans l'air, l'eau et les denrées (à l'exception du césium 137 rémanent des retombées atmosphériques anciennes [cf. chapitre 2]), sauf lors d'études spécifiques. Ainsi, d'août 2011 à avril 2012 et de janvier 2012 à août 2013, des stations de prélèvement d'aérosols à haut débit (300 m³/h) du réseau OPERA de l'IRSN ont été installées à proximité des CNPE de Golfech et du Tricastin respectivement. Les mesures hebdomadaires, réalisées au moyen des meilleures techniques disponibles, ont permis de quantifier assez régulièrement les activités volumiques dans l'air des principaux radionucléides (hors ³H et ¹⁴C) figurant dans les rejets gazeux : ⁶⁰Co (40 % du temps), ^{110m}Ag et ⁵⁸Co (30 % du temps), et plus sporadiquement, ⁵⁴Mn, ¹²⁴Sb, ⁵⁷Co et ⁵¹Cr (cf. tableau 5). Les activités mesurées sont extrêmement faibles, le plus souvent inférieures à 1 µBq/m³. Une personne qui résiderait aux endroits où étaient installées les stations de prélèvement recevrait une dose due à la présence de ces radionucléides dans l'air de 0,0004 µSv/an, dont 98 % par inhalation et 2 % par exposition externe. Cette dose est la plus faible de toutes celles mentionnées ci-dessus.

À partir de ces mesures d'activités de l'air, il est possible d'évaluer les activités des denrées produites localement qui en résultent, celles-ci ne pouvant être directement mesurées en raison d'activités trop faibles. Ainsi, pour les denrées les plus sensibles aux retombées atmosphériques, les légumes à feuilles, les activités seraient inférieures à 1 mBq/kg frais pour chacun des

radionucléides concernés ; ces niveaux sont, en effet, en-deçà des limites de détection des techniques métrologiques les plus performantes (de l'ordre de 3 à 10 mBq/kg frais pour les ⁶⁰Co, ⁵⁸Co et ^{110m}Ag). Dans le cas du ¹³⁷Cs, cette activité ajoutée ne peut être distinguée de la rémanence des retombées anciennes (cf. chapitre 2).

En milieu fluvial, les radionucléides autres que le tritium et le carbone 14 ne sont décelés que dans les sédiments, les matières en suspension et certains indicateurs biologiques (plantes aquatiques) et seulement au moyen des meilleures techniques disponibles mises en œuvre dans le cadre des études réalisées par l'IRSN et SUBATECH à la demande d'EDF. Il s'agit encore assez régulièrement du ⁶⁰Co (17 % des analyses 2008-2013) mais à des niveaux de plus en plus faibles, et de plus en plus rarement (moins de 10 % des analyses) du ⁵⁸Co, du ^{110m}Ag, ⁵⁴Mn et ¹³⁴Cs, en raison de la baisse des rejets depuis 1985. Ainsi, l'activité moyenne en ⁶⁰Co des végétaux aquatiques a baissé d'environ un facteur 10 depuis 1995. Le tableau 6 fournit à titre indicatif les valeurs minimales et maximales en ⁶⁰Co, ⁵⁸Co, ^{110m}Ag et ⁵⁴Mn mesurées sur la période 2008-2013 dans des végétaux aquatiques (mousses et phanérogames) dans le cadre de ces études spécifiques. Sauf très exceptionnellement, ces radionucléides ne sont pas décelables dans les poissons ; ils se trouvent à des niveaux extrêmement bas dans l'eau filtrée et la dose associée à leur incorporation est négligeable. Dans ces composantes du milieu aquatique, de l'iode 131 peut être mesuré irrégulièrement et à des niveaux très variables. La présence de ce radionucléide résulte des rejets hospitaliers.

TABLEAU 5 / ACTIVITÉS DANS L'AIR MESURÉES D'AOÛT 2011 À AVRIL 2012 ET DE JANVIER 2012 À AOÛT 2013, À PROXIMITÉ DES CNPE DE GOLFECH ET TRICASTIN (µBq/m³)

		¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	^{110m} Ag	⁵⁸ Co	⁵⁴ Mn	¹²⁴ Sb	⁵¹ Cr	⁵⁷ Co
Tricastin	Moyenne	0,35	0,84	0,79	1,05	0,27	0,32	2,95	0,06
	(min-max) (Fréquence de détection)	(0,07 - 1,59) (92 %)	(0,1 - 5,2) (40 %)	(0,07 - 4) (29 %)	(0,08 - 4,4) (29 %)	(0,08 - 0,93) (12 %)	(0,24 - 0,4) (3 %)	(2,5 - 3,4) (3 %)	(1 %)
Golfech	Moyenne	0,19	0,61	0,76	0,68	-	-	-	-
	(min-max) (Fréquence de détection)	(0,05 - 0,6) (83 %)	(4 %)	(4 %)	(0,18 - 1,2) (8 %)				

Enfin, les radionucléides mesurés en Manche, y compris au voisinage des CNPE, sont principalement imputables aux rejets liquides des installations d'AREVA La Hague ou de l'usine de Sellafield (Grande-Bretagne, cf. chapitre sur La Hague p. 112). La contribution vraisemblablement très faible des rejets d'effluents liquides des CNPE n'est pas distinguable par la mesure, à l'exception du ^{110m}Ag rejeté plus spécifiquement par les CNPE. Dans le cadre de la surveillance réglementaire, ce radionucléide est mesuré dans les sédiments, matières en suspension ou boues de décantation prélevés dans les émissaires de rejets (canaux ou puits), à des activités pouvant atteindre quelques Bq/kg de matière sèche (valeur maximale de 7,35 Bq/kg sec mesurée dans le canal marin de Gravelines en août-septembre 2012). Il a pu également être mesuré dans un échantillon de crevettes prélevé à la criée de Dunkerque (Gravelines) début décembre 2011 : 0,084 Bq/kg frais. En raison des performances métrologiques,

l' ^{110m}Ag est assez régulièrement mesuré dans les mollusques et les crustacés prélevés au voisinage des CNPE de la Manche et analysés dans le cadre du suivi réalisé pour le compte d'EDF par l'IRSN. Les activités les plus élevées sont mesurées près du port de Gravelines avec une moyenne sur la période 2000-2014 de 0,65 Bq/kg frais dans les mollusques et 0,1 Bq/kg frais dans les crustacés. Dans les poissons, les activités sont en moyenne inférieures à 0,04 Bq/kg frais. Même pour un gros consommateur de fruits de mer (31 kg/an de mollusques et 61 kg/an de crustacés), la dose potentiellement liée à l'incorporation de ^{110m}Ag sur la base de ces résultats de mesure serait très faible, de l'ordre de 0,05 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette dose est assez proche de la dose pour un consommateur « moyen » estimée par EDF par calcul sur la base des activités rejetées par le site de Gravelines : 0,08 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Elle est trois fois plus faible que celle estimée par EDF pour un gros consommateur de produits de la mer : 0,16 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

TABLEAU 6 / ACTIVITÉS MAXIMALES EN ^{58}Co , ^{60}Co ET ^{110m}Ag (Bq/kg sec) MESURÉES DANS DES PLANTES AQUATIQUES DURANT LA PÉRIODE 2008-2013 DANS LE CADRE DES ÉTUDES SPÉCIFIQUES RÉALISÉES À L'INITIATIVE D'EDF PAR L'IRSN ET SUBATECH

Site	^{58}Co	^{60}Co	^{110m}Ag
Chooz	1,2	1,4	
Cattenom	12	6,0	1,0
Fessenheim	0,7	2,0	
Nogent	89	4,9	0,5
Bugey	4,7	4,9	2,0
Saint-Alban	1,0	1,0	1,7
Cruas	1,1	0,3	0,8
Tricastin	3,1	2,1	1,6
Belleville	0,4	0,9	
Dampierre	8,4	4,6	1,9
Saint-Laurent	0,52		0,21
Chinon	0,3	0,95	
Civaux	1,3	0,81	0,3
Golfech	2,5	1,7	0,13
Blayais	0,15	0,07	

Conclusion

Aucune anomalie radiologique n'a été décelée entre juin 2011 et décembre 2014 dans l'environnement des centrales électronucléaires d'EDF ; notamment aucun rejet intempestif n'a été révélé par les stations de prélèvement sur filtre d'aérosols. Tous les dépassements de l'indice d'activité bêta global de référence dans l'air (2 mBq/m^3) observés sur la période, sont attribuables à des augmentations de la radioactivité naturelle (plomb 210 principalement), en relation avec des conditions météorologiques particulières. Cela a été notamment le cas, et pour l'ensemble du pays, à l'automne 2011 et en février 2012.

Les activités mesurées dans l'environnement sont conformes à celles attendues. Elles sont soit constantes par rapport aux années précédentes, soit s'inscrivent dans une diminution observable depuis plusieurs années et liée à la baisse des rejets. Le carbone 14 et le tritium, qui sont les deux radionucléides les plus abondants dans les rejets, sont les seuls pour lesquels l'influence des CNPE est observable tant en milieu terrestre qu'en milieu aquatique continental. En complet accord avec les évaluations dosimétriques effectuées par EDF pour ses rapports annuels TSN* ou ses demandes d'autorisation de rejets, ces deux radionucléides contribuent à l'essentiel de l'exposition de la population au travers notamment de deux scénarios spécifiques : l'ingestion de poissons de rivière (incorporation de carbone 14) et l'ingestion régulière d'eau de boisson prélevée dans le fleuve en aval d'un CNPE (incorporation de tritium).

Sur la base des mesures effectuées sur la période, ces deux scénarios sont susceptibles de conduire à des doses de l'ordre de $0,12 \text{ }\mu\text{Sv/an}$ et $0,1 \text{ }\mu\text{Sv/an}$ respectivement. L'influence très discrète des rejets atmosphériques de carbone 14 observable dans les denrées terrestres, pourrait conduire à une dose similaire, de l'ordre de $0,1 \text{ }\mu\text{Sv/an}$ également, dans l'hypothèse peu vraisemblable où toutes les denrées consommées seraient produites localement. Ces doses sont à comparer à celles imputables au ^{14}C d'origine naturelle : de l'ordre de $12 \text{ }\mu\text{Sv/an}$ (cf. chapitre 2).

En raison d'activités extrêmement faibles, les radionucléides autres que le carbone 14 et le tritium (^{60}Co et $^{110\text{m}}\text{Ag}$ notamment) susceptibles de résulter des rejets des CNPE, ne sont mesurables que lors d'études spécifiques réalisées à l'initiative d'EDF (suivis radioécologiques annuels et bilans décennaux) ou de l'IRSN. Les doses correspondantes sont faibles, voire négligeables au regard des précédentes. Les activités de ^{137}Cs mesurées dans l'environnement des CNPE ont quant à elles pour origine les retombées de l'accident de Tchernobyl et des essais atmosphériques d'armes nucléaires (cf. chapitre 2).

L'impact dosimétrique d'un CNPE évalué sur la base des mesures est donc compris entre $0,2$ et $0,9 \text{ }\mu\text{Sv/an}$, dans la gamme de celles calculées par EDF ($0,1$ à $3,2 \text{ }\mu\text{Sv/an}$) et résulte presque exclusivement de l'ingestion de radionucléides, notamment de tritium et de carbone 14. Cette gamme de doses se situe plus de mille fois en dessous de la limite réglementaire de dose admissible d'exposition d'origine artificielle (hors exposition médicale) pour la population : 1 mSv/an .

* Rapport Transparence et Sécurité nucléaire ; il s'agit des bilans annuels produits par les exploitants nucléaires et qui comportent des résultats de mesures dans l'environnement, ainsi que des évaluations dosimétriques

3.2. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE EN COURS DE DÉMANTÈLEMENT

Le site de Creys-Malville

Le site nucléaire de Creys-Malville, implanté dans le département de l'Isère, est situé en rive gauche du Rhône, sur la commune de Creys-Mépieu, à une cinquantaine de kilomètres en amont de l'agglomération urbaine de Lyon. Le site comprend deux installations nucléaires de base (INB) : la centrale électronucléaire de la filière des Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR) mise en service en 1985, mise à l'arrêt définitif en 1998 et actuellement en phase de déconstruction, et un ensemble d'installations dont l'atelier pour l'entreposage du combustible (APEC).

Rejets et surveillance de l'environnement

Conformément à la réglementation, le site de Creys-Malville dispose d'une autorisation spécifique pour rejeter des substances radioactives dans l'environnement. Les effluents radioactifs

liquides proviennent du rejet d'une partie de l'eau utilisée dans les installations. Les effluents radioactifs gazeux proviennent eux de la ventilation des bâtiments. Le tritium constitue de loin l'essentiel des activités rejetées : près de 99 % des rejets liquides et plus de 99,9 % des rejets gazeux. Le tableau 1 présente les activités rejetées pour la période de 2011 à 2014, la figure 1 présente l'évolution des rejets de tritium sous forme gazeuse et liquide de 2002 à 2014. On note l'augmentation régulière des rejets gazeux de 2002 à 2010 entre 0,1 et 1 TBq pour dépasser les 10 TBq de 2011 à 2013, et atteindre 48 TBq en 2014. Ces augmentations sont en liaison avec les opérations de démantèlement.

Le programme de surveillance réglementaire de l'environnement du site de Creys-Malville est présenté dans la figure 2. Il est complété par des études radioécologiques annuelles et décennales confiées par EDF à l'IRSN. Une étude spécifique à également été réalisée par l'IRSN à la demande d'EDF, du 24 septembre au 9 novembre 2012, pour connaître l'impact environnemental d'une séquence de rejets atmosphériques de tritium.

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS REJETÉES PAR LES INSTALLATIONS DE CREYS-MALVILLE POUR LA PÉRIODE DE 2011 À 2014

		Unité	Activité rejetée			
			2011	2012	2013	2014
Rejets radioactifs liquides	Tritium	TBq	0,00072	0,00091	0,0002	0,00263
	Hors Tritium	GBq	0,0077	0,0172	0,017	0,0149
Rejets radioactifs gazeux	Tritium	TBq	13,32	15,73	14,85	47,9
	Produits de fission ou d'activation	GBq	0,0015	0,0015	0,0032	0,00537
	Gaz rares (⁸⁵ Kr)	GBq	0,027	0,05	0,05	0,02

FIGURE 1 / ÉVOLUTION DES REJETS DE TRITIUM DU SITE DE CREYS-MALVILLE SOUS FORME GAZEUSE ET LIQUIDE DE 2002 À 2014 (TBq/an)

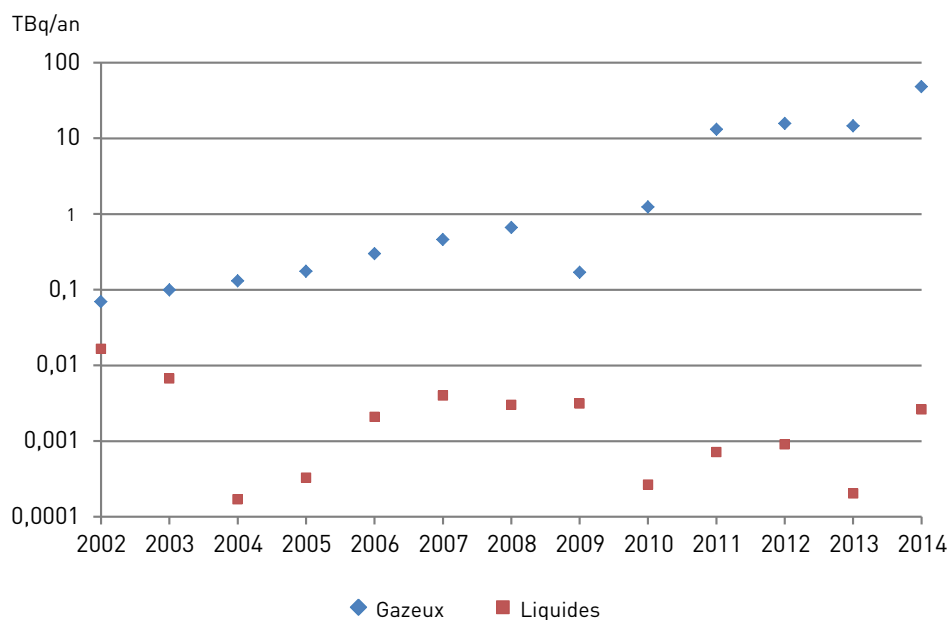
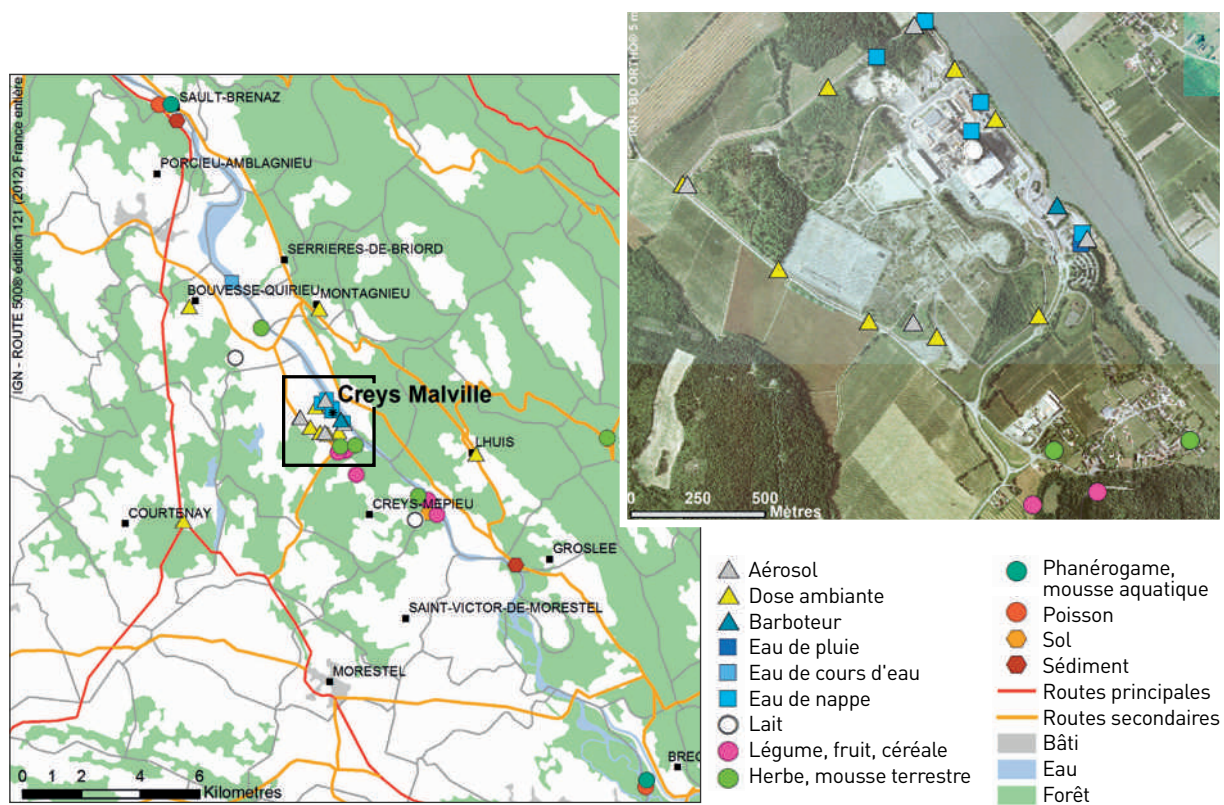


FIGURE 2 / REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE DU PLAN-TYPE DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT RÉALISÉE PAR EDF POUR LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE CREYS-MALVILLE

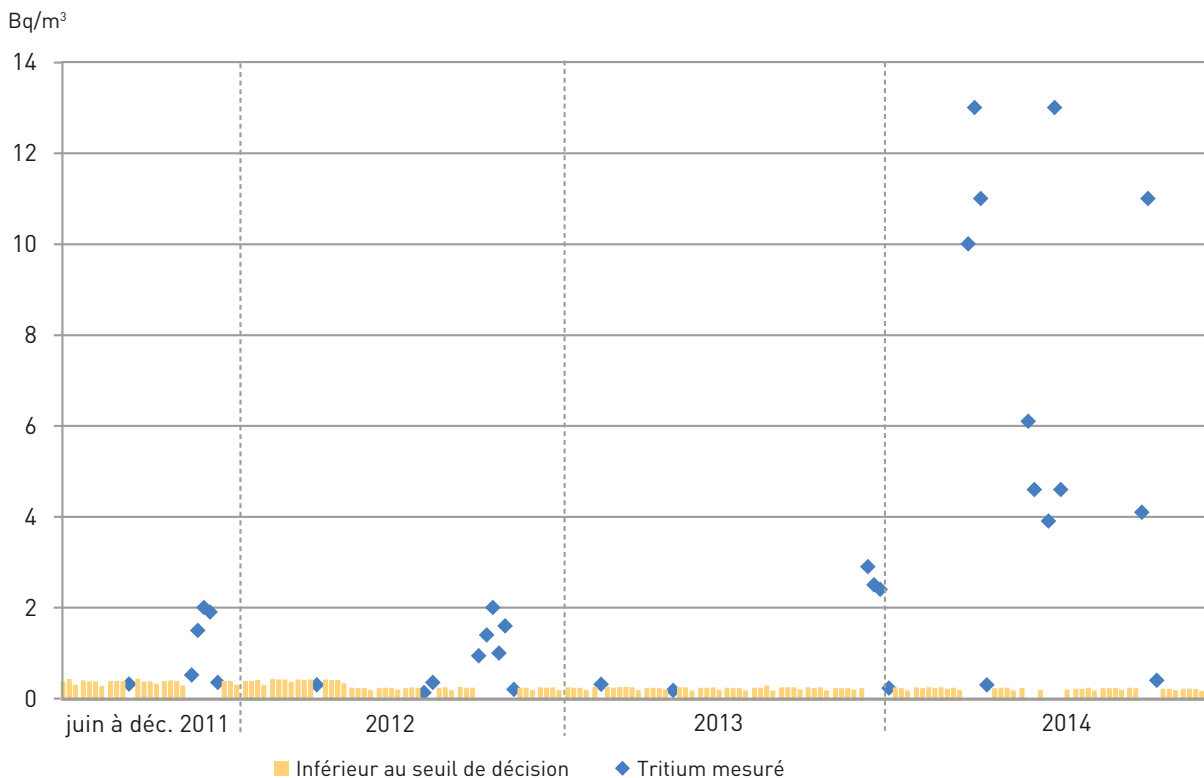


Influence du site de Creys-Malville sur son environnement et doses associées

L'influence des rejets de tritium de Creys-Malville est assez peu visible au travers des mesures effectuées dans l'environnement car ses rejets ne sont pas continus tout au long de l'année. Si l'activité moyenne en tritium total de l'air prélevé à proximité du site de Creys-Malville est de 0,28 Bq/m³, notablement plus élevée que celle correspondant au bruit de fond (entre 0,005 et 0,01 Bq/m³), elle résulte d'augmentations sur de courtes périodes (quelques jours) correspondant aux phases de rejets. La figure 3 présente les activités en tritium mesurées dans l'air, par EDF, sur le site de Creys-Malville de juin 2011 à décembre 2014. On note sur cette figure que l'augmentation significative des rejets de tritium atmosphérique en 2014, par rapport aux années précédentes, a eu pour conséquence l'augmentation du nombre de mesures significatives et des niveaux mesurés.

Les courtes augmentations de l'activité de l'air influencent de manière modérée et surtout très brève les autres composantes de l'environnement terrestre. Un échantillon d'eau de pluie, d'herbe ou de lait prélevé plusieurs jours après un rejet ne peut rendre compte de cette augmentation temporaire. Il en résulte que 88% des échantillons présentent des activités inférieures au seuil de décision qui se situe autour de 2,7 Bq/L. Ainsi, les activités en tritium des eaux de pluie mesurées dans le cadre de la surveillance réglementaire sont toutes inférieures au seuil de décision de 5 Bq/L, et les activités mesurées dans le lait ne sortent pas du bruit de fond (1 à 3 Bq/L) avec 2,44 Bq/L mesuré dans du lait de Creys-Mépieu et 2,79 Bq/L dans du lait de Bouvesse-Quirieu. Afin de mieux caractériser la situation durant les rejets, EDF a demandé à l'IRSN de réaliser une campagne de mesure spécifique lors de l'une d'elles : 12 TBq de tritium rejetés entre le 24 septembre et le 9 novembre 2012.

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DU TRITIUM MESURÉES DANS L'AIR AUTOUR DU SITE DE CREYS-MALVILLE DE JUIN 2011 À DÉCEMBRE 2014 (Bq/m³)



À l'exception de l'iode 131, d'origine médicale, mesuré dans les végétaux aquatique, les autres mesures réalisées dans l'environnement du site de Creys-Malville relèvent toutes, soit de la radioactivité naturelle, soit de la rémanence des retombés de l'accident de Tchernobyl ou de celles des essais d'armes nucléaires.

L'étude des résultats de mesures radiologiques des échantillons environnementaux prélevés dans l'environnement du site de Creys-Malville montre que l'influence des rejets du centre n'est liée qu'au tritium. Pour estimer la dose à partir des concentrations mesurées dans les différents compartiments, les voies d'exposition considérées sont : l'ingestion de denrées et d'eau, l'inhalation, l'incorporation transcutanée. Pour l'exposition par inhalation et transcutanée, la dose est évaluée pour un adulte séjournant aux alentours du site 100 % de son temps et la valeur de concentration dans l'air est la moyenne pondérée à la station de prélèvement avec un débit d'inhalation de 24 m³/jour. La consommation de lait est estimée à 200 mL par jour. Dans l'air, le niveau moyen du tritium est de 0,28 Bq/m³, les activités dans les autres matrices de l'environnement étant du même ordre de grandeur que celles mesurées

hors influence de toutes installations à l'exception d'un léger marquage du lait de vache (≈ 1 Bq/L ajouté en tritium libre). Avec ces hypothèses, la dose par inhalation et transfert percutané serait de 0,07 μ Sv/an si 100 % du tritium rejeté est sous forme HTO et 0,0000043 μ Sv/an sous forme HT. En tenant compte de l'étude de 2012 qui a montré que le tritium rejeté était constitué à 90 % de HT et 10 % de HTO la dose serait alors de 0,007 μ Sv/an. La dose par ingestion de lait serait, elle, de 0,0077 μ Sv/an.

Si l'on considère la dose susceptible d'avoir été reçue durant la phase de rejet de 6 semaines de septembre-novembre 2012. La dose par inhalation et transfert percutané serait au maximum de 0,0025 μ Sv (essentiellement imputable au tritium sous forme vapeur d'eau) et la dose par ingestion serait de 0,0019 μ Sv, soit un total de 0,0044 μ Sv.

Ainsi, les estimations les plus pénalisantes basées sur les activités mesurées dans l'environnement du site de Creys-Malville, conduisent à des doses liées au tritium extrêmement faibles, inférieures à 0,07 μ Sv/an. Cette valeur est très proche de celle estimée par modélisation par EDF sur la base des rejets de 2013 : 0,11 μ Sv/an dont plus de 99 % sont dus au tritium.



Lyophilisation d'un échantillon préalablement à la mesure du carbone 14

© DR

Le Site de Brennilis

Le site des Monts d'Arrée (SMA) est implanté au cœur du Finistère, sur la commune de Brennilis, à 35 km au Sud de Morlaix. Il est situé en bordure Est du lac Saint-Michel. Le site comporte la centrale nucléaire de Brennilis et les barrages hydrauliques de Saint-Michel et Saint-Herbot. La centrale nucléaire de Brennilis a été exploitée de 1967 à 1985, sa puissance était de 70 MW. Définitivement arrêtée depuis 1985, elle est en cours de déconstruction.

Rejets et surveillance de l'environnement

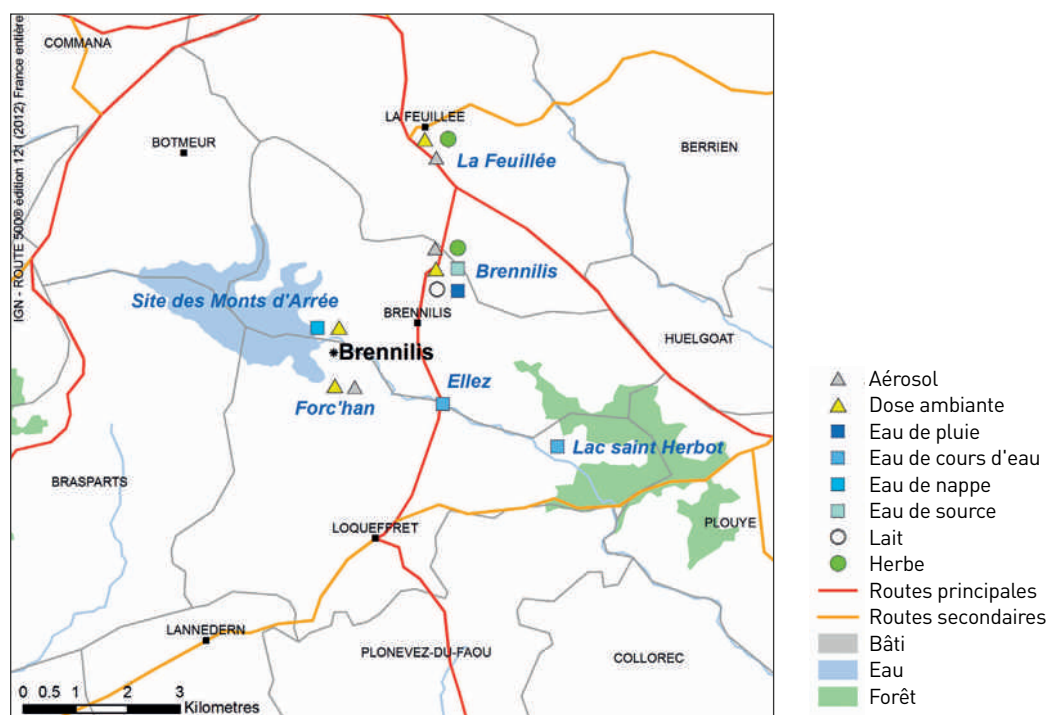
Pendant la période de fonctionnement de l'installation, les rejets d'effluents étaient composés principalement de tritium, aussi bien dans les effluents liquides que dans les effluents gazeux. Après l'arrêt de l'installation, une production d'effluents gazeux de tritium a perduré, mais à des niveaux moindres. Pour les effluents liquides, le rejet dans l'Ellez a eu lieu jusqu'en 1992 ; postérieurement à cette date, les rejets ont cessé. Les effluents liquides, en moindre quantité et dépourvus de tritium sont

désormais expédiés à l'extérieur du site pour traitement. Conformément à la réglementation, le site des Monts d'Arrée dispose d'une autorisation spécifique pour rejeter des substances radioactives, sous forme gazeuse uniquement, dans l'environnement. Les rejets radioactifs gazeux proviennent de la ventilation des bâtiments. Le tritium constitue la majeure partie des activités rejetées. Le tableau 1 présente les activités rejetées pour la période de 2012 à 2014. Les fluctuations dans les rejets sont liées aux opérations de démantèlement.

Le programme de surveillance réglementaire de l'environnement du site des Monts d'Arrée est présenté dans le tableau 2 et la figure 1. Il est complété par des études radioécologiques ponctuelles ou annuelles confiées par EDF à des laboratoires externes. Ce programme permet d'assurer un suivi :

- des eaux de pluie (station météorologique de Brennilis) ;
- des eaux de surface (Ellez, Lac de St Herbot) ;
- des eaux souterraines (source de la Vierge à Brennilis, nappe phréatique sous le site) ;

FIGURE 1 / CARTE DE LOCALISATION DES PRÉLÈVEMENTS DU PLAN DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE BRENNILIS



- de l'air (stations météorologiques de Brennilis, la Feuillée, et Forc'han) ;
- de la chaîne alimentaire (Brennilis, La Feuillée) ;
- du rayonnement ambiant (stations météorologiques de Brennilis et La Feuillée).

Influence de la centrale de Brennilis sur son environnement

L'absence de rejets liquides et des rejets gazeux très faibles, expliquent pourquoi les résultats de mesure de la surveillance environnementale autour du site, sont tous inférieurs aux seuils de décision, y compris pour le tritium.

Afin de mieux caractériser l'influence potentielle sur l'environnement des opérations de déconstruction, EDF a demandé à l'IRSN de réaliser un suivi environnemental du site pour une durée de 5 années à compter de 2012. Les mesures par spectrométrie gamma et alpha des différents échantillons mesurés dans les compartiments terrestre ou aquatique de l'environnement

montrent des niveaux de radioactivité, qui peuvent être plus élevés que la moyenne française, mais qui relèvent soit de la radioactivité naturelle (radio-nucléides des chaînes naturelles de l'uranium), soit de la rémanence des retombées des essais d'armes nucléaires (¹³⁷Cs et isotopes du plutonium), dans une très faible mesure de l'accident de Tchernobyl. La géologie particulière des sols, ainsi que la pluviométrie élevée du site peuvent expliquer ces résultats de radioactivité naturelle et de radioactivité artificielle, respectivement. Dans le milieu terrestre, les niveaux d'activité en ³H et ¹⁴C correspondent aux niveaux ambiants mesurés en dehors de toute influence industrielle. Dans le milieu aquatique, il n'y a pas de différence significative entre les teneurs en ¹⁴C des poissons pêchés en amont et en aval. Ce constat va de pair avec le marquage en ³H organiquement lié et en ¹⁴C dans les sédiments, qui est le résultat d'un marquage ancien par les rejets du site, comme cela a pu être montré lors d'études menées par l'IRSN en 2002 et 2008. Ces marquages sont toutefois en constante diminution, le site ne rejetant plus d'effluents liquides depuis 1992.

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS REJETÉES PAR L'INSTALLATION DE BRENNILIS POUR LA PÉRIODE DE 2012 À 2014

Bilan des rejets atmosphériques			
	Tritium (TBq/an)	Autres produits de fission ou d'activation émetteurs bêta et gamma (GBq/an)	Carbone 14 (GBq/an)
Activités rejetées en 2012	39,9	0,00118	0,0694
Activités rejetées en 2013	39,8	0,000025	0,2
Activités rejetées en 2014	31,6	0,0000096	0,23

TABEAU 2 / PLANS DE LA SURVEILLANCE RÉALISÉE PAR EDF ET PAR L'IRSN DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE BRENNILIS

Milieu surveillé ou nature du contrôle	EDF	IRSN
Rayonnement gamma ambiant	4 dosimètres en bordure de site, 5 points dans un rayon de 1 km (dont les stations AS1 de Brennilis et AS3 de Forc'han) et 1 dosimètre dans un rayon de 5 km (stations AS2 de La Feuillée), analyses mensuelles	2 dosimètres analysés semestriellement.
Milieu atmosphérique	Prélèvements sur filtre avec analyse bêta total aux 3 stations AS mesure quotidienne de l'activité bêta totale + mesure hebdomadaire du tritium dans l'air à la station de Brennilis (AS1)	Prélèvements sur filtre (station AS1) à la station de Brennilis avec analyse bêta total, fréquence journalière et mesure gamma hebdomadaire.
Milieu aquatique continental	2 prélèvements bimensuels d'eau dans le milieu récepteur (Pont de Forhan et rivière Ellez) avec mesure de l'activité bêta globale, du potassium et du tritium sur l'eau filtrée + bêta globale sur les MES Prélèvement mensuel en amont du lac de saint-Herbot avec mesure de l'activité bêta globale, du potassium et du tritium sur l'eau filtrée et de l'activité bêta globale sur les MES Prélèvement mensuel au niveau du rejet des eaux pluviales dans l'Ellez avec mesure de l'activité bêta globale dans les MES Prélèvements annuels de sédiments et de végétaux aquatiques et prélèvement quinquennal de poissons à l'amont et à l'aval de l'INB avec analyse par spectrométrie gamma (dont le potassium 40) et mesure de l'activité bêta globale	
Milieu terrestre	2 prélèvements trimestriels d'herbe avec mesure de l'activité bêta globale, du potassium 40 et une spectrométrie (1 à La Feuillée et 1 à Brennilis) + mesure annuelle du carbone 14 et du carbone élémentaire dans l'échantillon prélevé à l'AS1 1 prélèvement de lait trimestriel avec mesure activité strontium 90, potassium 40, tritium + spectrométrie gamma Prélèvements annuels des principales productions agricoles et couches superficielles des terres avec mesure de l'activité bêta globale, potassium 40, spectrométrie gamma + carbone 14 sur espèce destinée à la consommation humaine	
Eaux souterraines	2 points de prélèvements sur le site avec mesure du tritium et de l'activité bêta globale hebdomadaire et spectrométrie gamma mensuelle, 1 point de prélèvements sur le site avec mesure bimensuelle du tritium et de l'activité bêta globale	
Pluie	eaux de pluie recueillies en continu avec mesure tritium, potassium et bêta total tous les mois	

3.3. LES SITES INDUSTRIELS

Le site de Malvési

Depuis 1959, l'usine AREVA de Malvési, localisée à 3 km au nord de la ville de Narbonne (département de l'Aude, cf. figure 1), assure la purification de concentrés d'uranium (« yellow cake ») et la conversion de l'uranium en UF₄. La production annuelle de l'usine de conversion est de l'ordre de 12 000 tonnes par an. Les effluents issus du procédé de purification de l'uranium sont traités puis aboutissent à des bassins de décantation et d'évaporation localisés sur le site. En plus de l'usine de conversion de l'uranium, le site AREVA de Malvési comporte d'anciens bassins d'effluents (B1/B2), aujourd'hui dédiés à l'entreposage de déchets (INB ECRIN).

Rejets et plan de surveillance

Les rejets de radionucléides de l'usine de Malvési contiennent exclusivement de l'uranium. Les rejets liquides sont effectués dans le canal du Tauran qui

longe le site de Malvési. Le canal de Tauran aboutit dans le canal de la Robine qui traverse la ville de Narbonne avant de se jeter dans l'Étang de Bages-Sigean. La masse d'uranium rejetée annuellement est de l'ordre de 9,2 kg par an, équivalent à 0,23 GBq d'uranium naturel. Les rejets d'uranium dans l'atmosphère sont en constante diminution au fil des années (cf. figure 2). La quantité d'uranium rejetée dans l'atmosphère par les différents ateliers de l'usine a été de 19,6 kg pour l'année 2013, correspondant à 0,50 GBq d'uranium naturel.

À ces rejets d'uranium liés au fonctionnement de l'usine s'ajoutent les radionucléides provenant de l'INB ECRIN : il s'agit d'émissions diffuses de faibles quantités des poussières mises en suspension par le vent malgré la couverture en place sur les bassins B1/B2 depuis 2007, ainsi que des eaux pluviales collectées au niveau de l'INB puis envoyées dans les bassins d'évaporation ou rejetées dans le canal de Tauran, après traitement. Les radionucléides susceptibles d'être émis par l'installation ECRIN sont principalement le ²³⁰Th, radionucléide naturel descendant de l'²³⁸U et dans une moindre mesure le plutonium, radionucléide artificiel.

FIGURE 1 / LOCALISATION DU SITE AREVA DE MALVÉSI

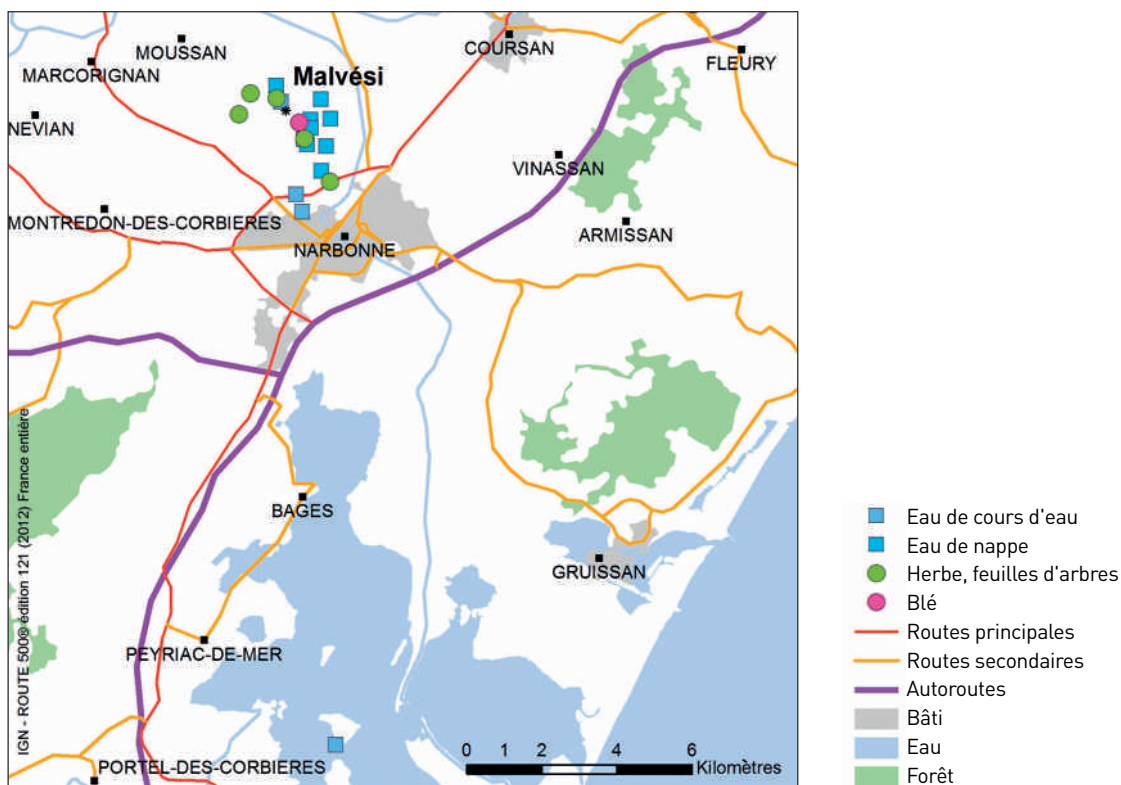
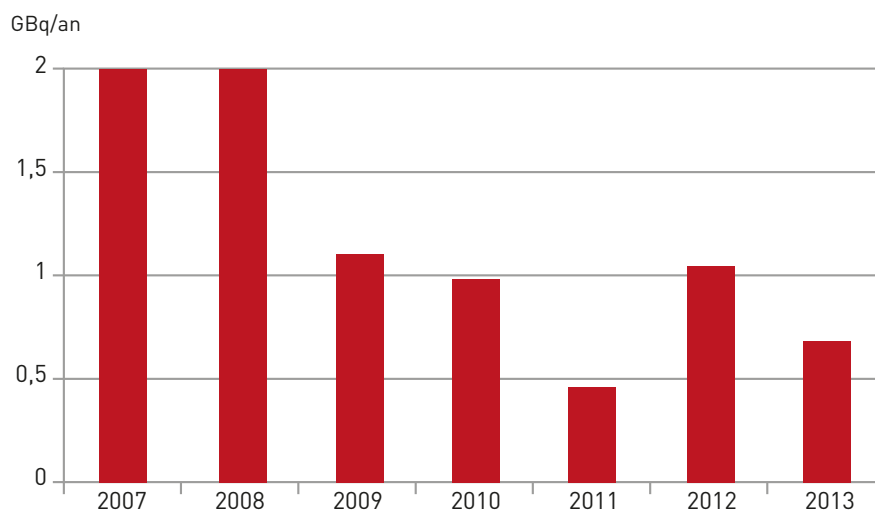


FIGURE 2 / CHRONIQUE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES DES ISOTOPES DE L'URANIUM PAR L'USINE DE MALVÉSI



L'usine de conversion de l'uranium de Malvési est soumise à la réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) et aux prescriptions de son arrêté préfectoral en matière de surveillance de l'environnement. La surveillance de l'INB ECRIN s'inscrit également dans le plan de surveillance de l'usine. AREVA effectue des prélèvements périodiques en milieu aquatique, dans le canal de Tauran, à l'amont et à l'aval du point de rejet. Des prélèvements complémentaires sont réalisés plus à l'aval, dans la ville de Narbonne (canal de la Robine) jusqu'à l'Étang de Bages-Sigean. La concentration en uranium est également mesurée dans l'eau de nappe prélevée à proximité du site, en « ceinture proche » et dans des puits de riverains situés à un kilomètre environ du site, en « ceinture éloignée ». Les productions agricoles locales (fruits et légumes) font aussi l'objet de mesures de la part de l'exploitant.

Dans l'environnement de Malvési, l'IRSN privilégie la mesure de l'uranium dans les eaux de surface (canal de Tauran), les végétaux terrestres (feuilles d'arbres et herbe) et les denrées agricoles (blé et légumes feuilles).

Enfin, en 2007-2008, le site de Malvési a fait l'objet d'une étude radioécologique réalisée par l'IRSN à la demande d'AREVA au cours de laquelle de nombreuses matrices de l'environnement terrestre et aquatique ont été prélevées et analysées (mesure de l'uranium, de ses descendants radioactifs et du plutonium). En 2010, des mesures complémentaires de l'activité en uranium dans l'air ont été réalisées à proximité

de l'usine par l'IRSN. Enfin, des prélèvements et des mesures ont été réalisés dans le cadre des inspections de l'Autorité de Sûreté Nucléaire menées en 2011 et 2013.

Influence du site de Malvési sur l'environnement et l'exposition du public

Les isotopes de l'uranium (^{234}U , ^{235}U et ^{238}U) sont les radionucléides pour lesquels l'influence du site de Malvési est la plus visible dans l'environnement terrestre et aquatique. En effet, les rejets en uranium provenant de la conversion contribuent d'une part à une augmentation locale de l'activité en uranium de l'air et par voie de conséquence des végétaux terrestres, et d'autre part au marquage des eaux de surface et des végétaux aquatiques.

L'activité moyenne observée sur les aérosols prélevés sous les vents dominants et à proximité immédiate de l'usine a été, en 2010, de $30 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air pour l' ^{238}U . Cette valeur est à comparer au niveau de l'activité de l'uranium observé en France en dehors de l'influence des installations du cycle du combustible : de l'ordre de $0,1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air.

Des prélèvements de feuilles de cyprès ont été réalisés au nord (lieu-dit « L'Oeillal »), à l'est (Tauran) et au sud du site AREVA (Livière-Basse), à plusieurs reprises entre 2011 et 2014. D'autres matrices végétales (aiguilles de pin et herbe de prairie) ont également été prélevées à l'ouest (les Almérats Hauts et Échine d'Ane) et à l'est du site (Tauran), respectivement (cf. figure 3).

FIGURE 3 / ACTIVITÉS MASSIQUES EN ^{238}U DES VÉGÉTAUX PRÉLEVÉS DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE AREVA DE MALVÉSI ENTRE 2011 ET 2014 (Bq/kg de matière sèche)

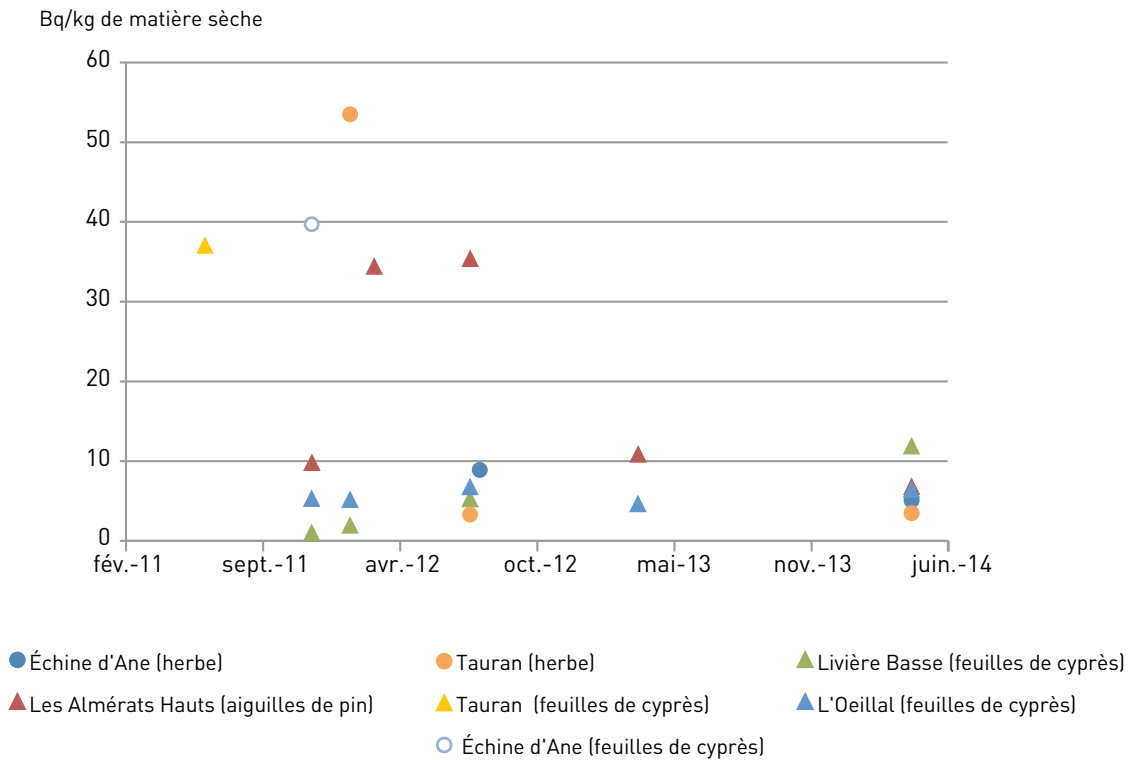
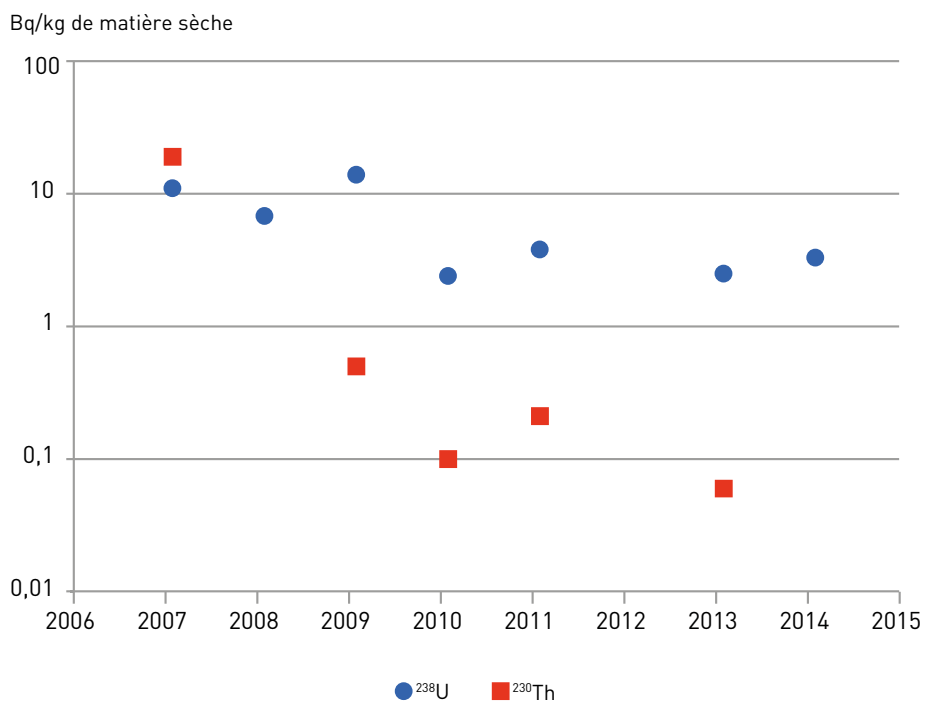


FIGURE 4 / ACTIVITÉS MASSIQUES EN ^{238}U ET EN ^{230}Th DES ÉPIS DE BLÉ PRÉLEVÉS À L'EST DU SITE AREVA DE MALVÉSI ENTRE 2007 ET 2014 (Bq/kg de matière sèche)



Les activités en ^{238}U les plus élevées, supérieures à 10 Bq/kg sec, sont observées dans les feuilles d'arbres prélevées à l'est et à l'ouest du site, sous les vents dominants provenant du site AREVA (les Almérats Hauts, Échine d'Ane et Tauran). Les activités les plus basses sont observées dans les végétaux de Livière-Basse. Ainsi, les activités mesurées dans les végétaux terrestres témoignent de l'influence (plus ou moins marquée d'un site de prélèvement à l'autre) des rejets d'uranium provenant du site AREVA de Malvési.

Les activités massiques en ^{238}U des épis de blé prélevés en bordure est du site de Malvési sont relativement élevées : une moyenne de 3,2 Bq/kg sur la période 2011-2014. Les valeurs observées depuis 2010, bien que plus faibles que celles des 3 années précédentes (cf. figure 4), restent cependant supérieures à celles réalisées par l'IRSN en dehors de l'influence des rejets de l'industrie nucléaire (activité comprise entre 0,011 et 0,17 Bq/kg). Des légumes feuilles ont également été prélevés dans les jardins des riverains de l'usine en 2011 et 2013.

Dans ces matrices, l'activité massique moyenne en ^{238}U est de 0,16 Bq/kg de matière fraîche. Cette activité correspond à la « valeur haute » de la fourchette des mesures réalisées dans les légumes feuilles par l'IRSN (activité en uranium comprise entre 0,008 et 0,12 Bq/kg de matière fraîche).

Dans les eaux prélevées à l'aval des rejets (canal de Tauran), la concentration volumique en uranium, en moyenne de 1,9 $\mu\text{g/L}$ (équivalente à une activité moyenne en ^{238}U de 0,023 Bq/L), est deux fois supérieure à la concentration moyenne en amont (0,9 $\mu\text{g/L}$) (cf. figure 5). La figure 6 montre toutefois que cette moyenne a considérablement diminué depuis le début des années 2000. D'autre part, le suivi de l'eau de la nappe phréatique, prélevée chez des riverains du site, montre que la concentration volumique en uranium varie d'un point de prélèvement à un autre et au cours du temps (cf. figure 7). La concentration moyenne en uranium est de 1,3 $\mu\text{g/L}$, équivalente à une activité moyenne en ^{238}U de 0,015 Bq/L, sans que l'origine de l'uranium soit connue avec certitude (naturelle ou liée au site).



FIGURE 5 / TENEUR EN URANIUM DANS L'EAU DU CANAL DE TAURAN, À L'AMONT ET À L'AVAL DES REJETS DU SITE DE MALVÉSI ENTRE 2011 ET 2014 ($\mu\text{g/L}$)

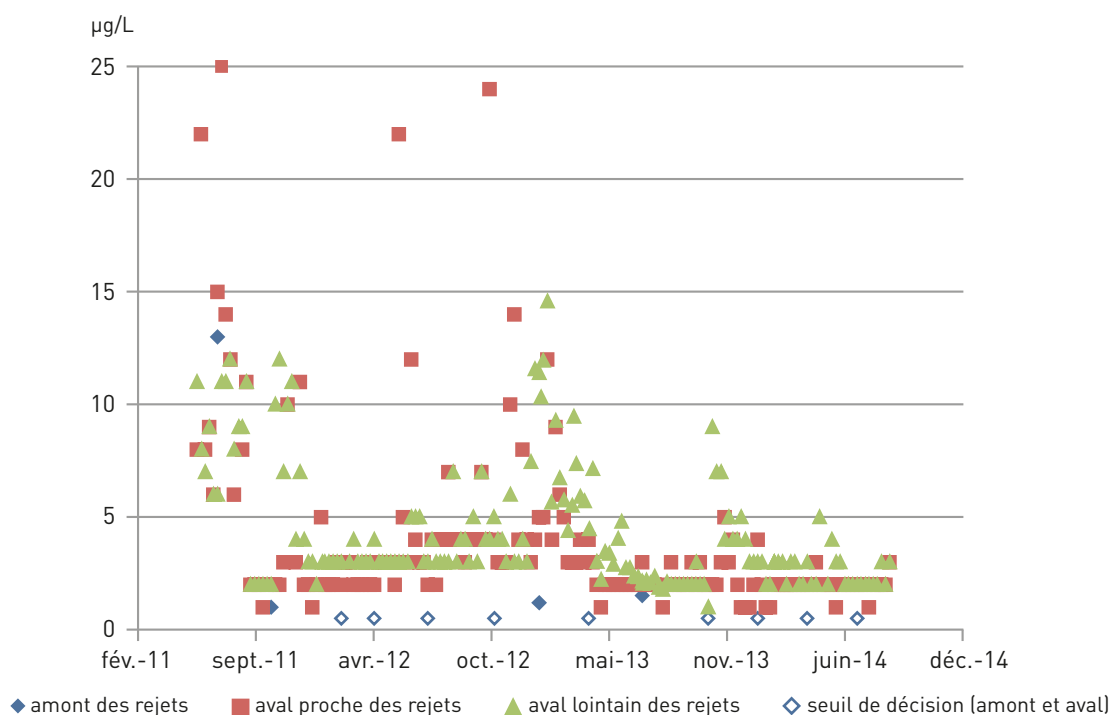


FIGURE 6 / CHRONIQUE DE LA CONCENTRATION VOLUMIQUE EN URANIUM DANS LES EAUX DU CANAL DE TAURAN ENTRE 1997 ET 2014 (µg/L)

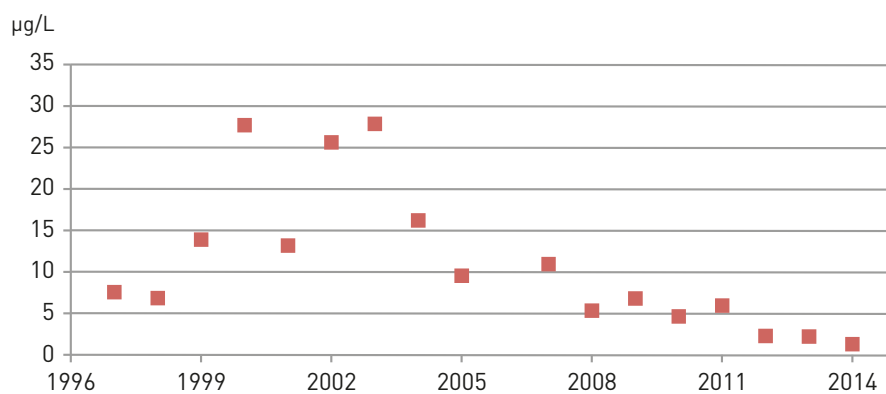
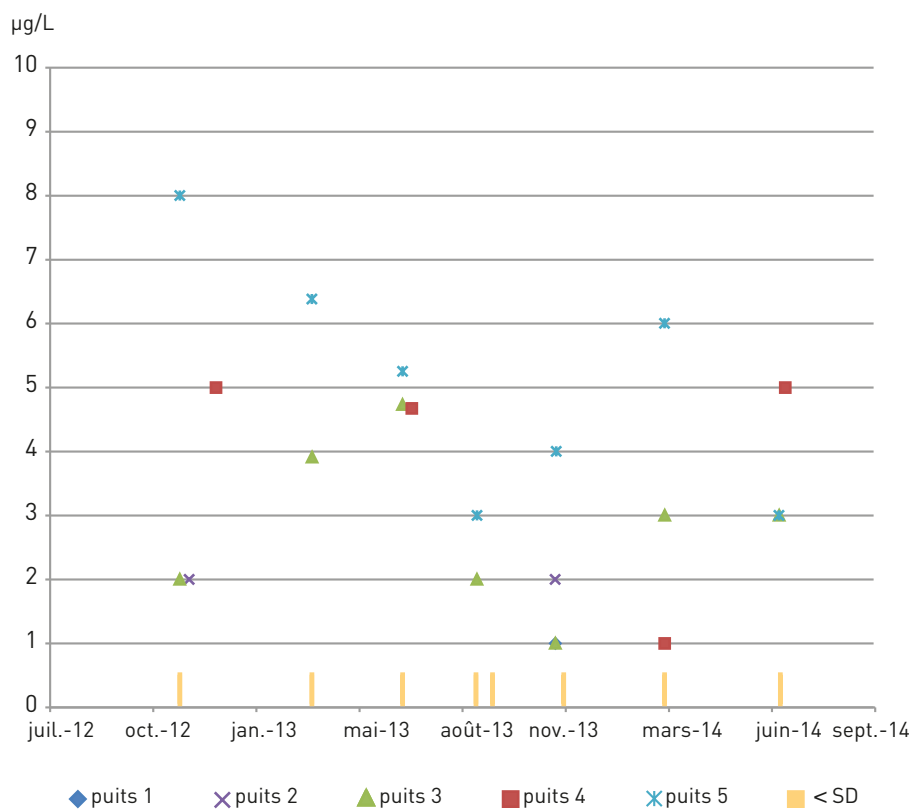


FIGURE 7 / CONCENTRATION VOLUMIQUE EN URANIUM DANS L'EAU PRÉLEVÉE DANS CINQ PUIITS DE RIVERAINS DE L'USINE AREVA DE MALVÉSI ENTRE 2012 ET 2014 (µg/L)



Outre l'uranium, d'autres radionucléides sont mesurés dans l'environnement de Malvési, mais en quantités beaucoup plus faibles. Ces radionucléides, parmi lesquels le thorium 230 et le plutonium 239+240, proviennent de l'INB ECRIN. Lors de l'étude IRSN de 2010, l'activité moyenne en ^{230}Th de l'air était de $2,3 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air. Ce niveau moyen élevé, comparé au niveau d'activité dans l'air du thorium 232 représentant le fond radiologique (en moyenne $0,17 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air) et aux valeurs publiées dans d'autres pays, témoigne des émissions de poussières provenant de l'INB ECRIN. L'activité en ^{230}Th du blé prélevé en bordure du site a considérablement diminué depuis les travaux de 2007 (cf. figure 4). Elle était en 2013 de $0,06 \text{ Bq}/\text{kg}$ sec, c'est-à-dire dans la fourchette des mesures réalisées par l'IRSN hors influence des rejets, entre $0,009$ et $0,2 \text{ Bq}/\text{kg}$. De même, l'activité en ^{230}Th mesurée dans les légumes feuilles ($0,04 \text{ Bq}/\text{kg}$ de matière fraîche) est dans la fourchette des observations « hors influence des rejets » par l'IRSN (de $0,005$ à $0,4 \text{ Bq}/\text{kg}$ de matière fraîche).

En concordance avec les activités environnementales mesurées, les isotopes de l'uranium constituent la principale source d'exposition potentielle

des populations riveraines aux rejets provenant du site. Résider dans la zone influencée par les rejets atmosphériques située à l'est de l'usine conduirait à une dose efficace par inhalation de poussières d'uranium de $2,0 \mu\text{Sv}/\text{an}$. En supposant une consommation quotidienne de $93 \text{ g}/\text{j}$ de légumes feuilles dont 83% seraient produits dans les potagers riverains (moyennes des enquêtes alimentaires menées par l'IRSN autour du Tricastin, Marcoule et Blayais), la dose estimée serait de $0,4 \mu\text{Sv}/\text{an}$. Ces évaluations dosimétriques sont comparables aux calculs proposés par l'exploitant dans l'hypothèse d'inhalation et d'ingestion des légumes feuilles en bordure de site ; $1,7\text{-}19 \mu\text{Sv}/\text{an}$ et $0,12\text{-}1,3 \mu\text{Sv}/\text{an}$, respectivement. Les différentes enquêtes alimentaires menées en France montrent que le blé et les dérivés céréaliers consommés ne sont jamais produits localement. Si c'était le cas, la consommation d'un kilogramme du blé¹ produit en bordure du site conduirait à une dose de $0,01 \mu\text{Sv}/\text{kg}$. De même, il n'est pas envisageable de boire régulièrement l'eau du canal de Tauran. Toutefois, si cela se produisait (remplissage d'une gourde, par exemple), la consommation de 1 L conduirait à une dose due à l'uranium extrêmement faible de $0,002 \mu\text{Sv}/\text{L}$.



Vue aérienne du site de Malvési

1. Pour le calcul de dose, le blé est supposé consommé sans sa cuticule, à la surface de laquelle s'est déposé l'uranium rejeté par le site. (Activité en ^{238}U du blé sans sa cuticule : $0,13 \text{ Bq}/\text{kg}$.) La consommation d'un kg de blé complet à une activité moyenne de $3,2 \text{ Bq}/\text{kg}$ conduirait à une dose de $0,3 \mu\text{Sv}/\text{kg}$.

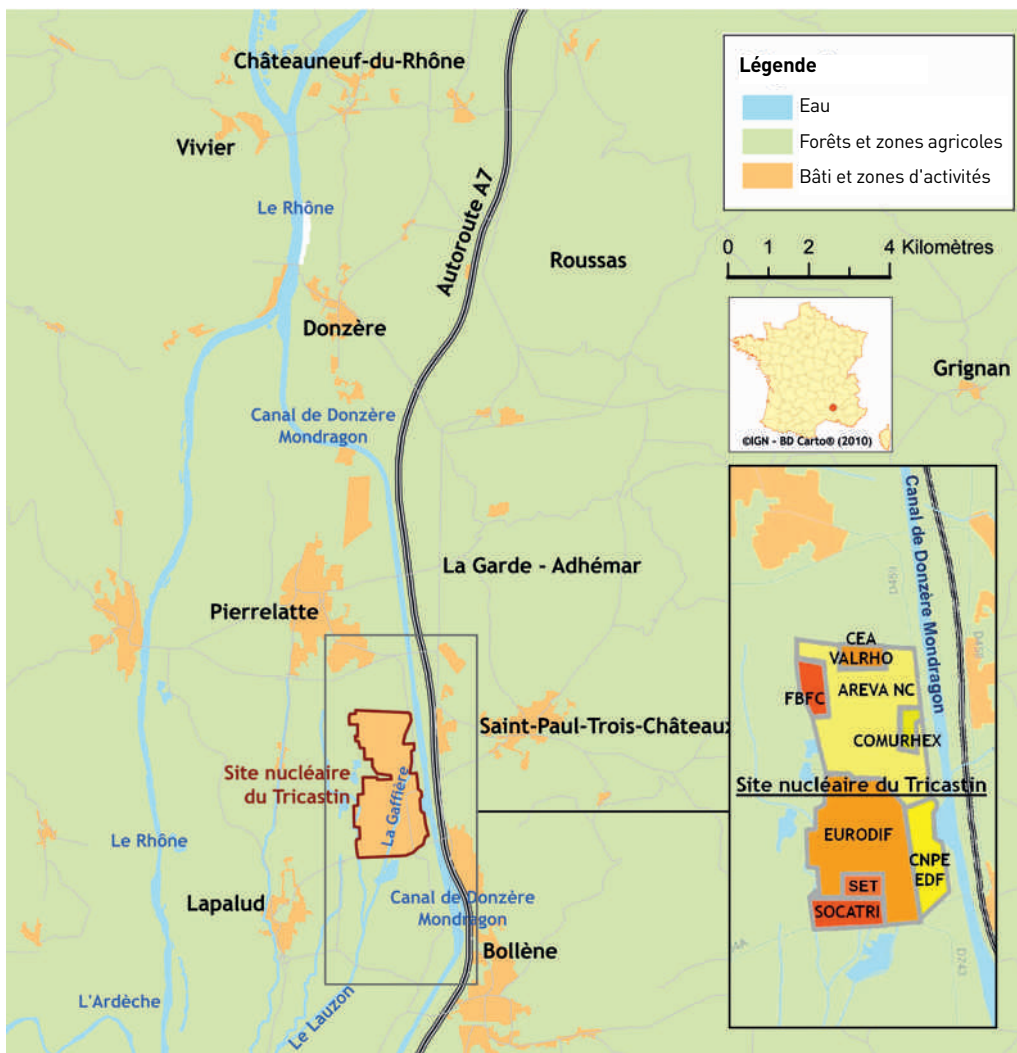
Le site du Tricastin

Situé dans la vallée du Rhône entre Bollène et Pierrelatte, à proximité du CNPE d'EDF, le site du Tricastin regroupe plusieurs établissements chargés de la fabrication de composants mécaniques pour les assemblages de combustibles et de sources radioactives, ainsi que de l'enrichissement et la conversion de l'uranium (cf. figure 1). AREVA NC intervient essentiellement dans la chimie de l'uranium (défluoruration et dénitruration de l'uranium, notamment) ainsi que dans le démantèlement des anciennes usines d'enrichissement par diffusion gazeuse et la maintenance des conteneurs de transport d'uranium. AREVA NC (ex-COMURHEX) assure la conversion de l'uranium (UF_4 provenant de Malvésij) en UF_6 .

L'enrichissement de l'uranium par centrifugation est assuré par la Société d'Enrichissement du Tricastin (SET) dans les usines Georges Besse II, alors que l'usine d'enrichissement par diffusion gazeuse EURODIF est arrêtée depuis juin 2012. Enfin, SOCATRI est chargé du traitement des effluents uranifères ainsi que du traitement, de l'entreposage et de l'élimination de déchets radioactifs et conventionnels, notamment issus des hôpitaux et de laboratoires, pour le compte de l'ANDRA.

Au total, le site du Tricastin compte cinq Installations Nucléaires de Base (INB) et une INBS (Installation Nucléaire de Base Secrète). Il comprend également sept Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

FIGURE 1 / LOCALISATION DU SITE AREVA DU TRICASTIN



Les rejets radioactifs du site du Tricastin

Bien qu'une grande partie de l'activité industrielle du site concerne l'uranium, des radionucléides artificiels, produits de fission ou d'activation, sont rejetés par les installations du site du Tricastin (cf. figures 2 et 3). Depuis 2010, les rejets sont constants dans le temps, voire, dans certains cas, en diminution. Le ^{14}C et le tritium sont prépondérants dans les rejets atmosphériques, en quantité comparable (3 et 2 GBq/an, respectivement en 2013). Les activités en uranium

rejetées dans l'air, tous isotopes confondus, sont environ 100 fois plus faibles (0,03 GBq, en 2013) et proviennent principalement de l'usine COMURHEX. Les transuraniens (isotopes du plutonium notamment) et les produits de fission proviennent essentiellement d'AREVA NC (0,003 et 0,007 GBq/an, respectivement en 2013). Les vents dominants de la vallée du Rhône (de secteur N-NE et S-SW à 80 et 15 %, respectivement) dispersent les rejets au nord et surtout au sud du site, qui constitue la principale zone influencée par les rejets atmosphériques provenant du site du Tricastin.

FIGURE 2 / CHRONIQUE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES DU SITE AREVA DU TRICASTIN PENDANT LA PÉRIODE 2008-2013 (GBq/an)

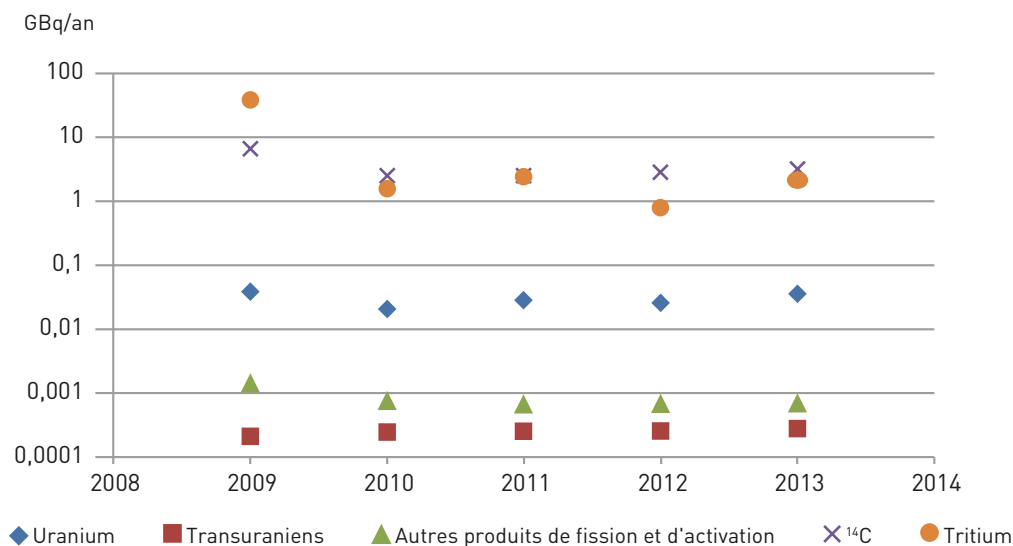
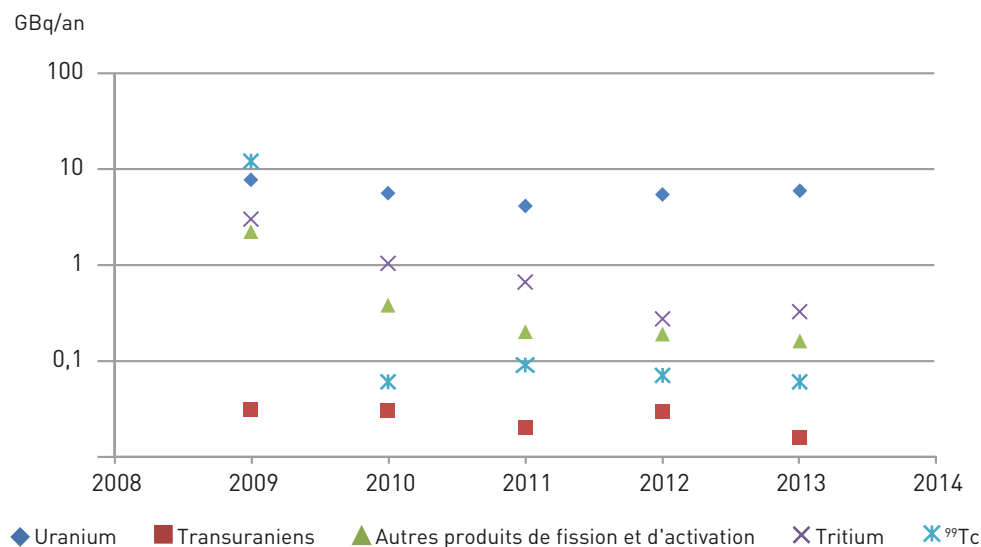


FIGURE 3 / CHRONIQUE DES REJETS LIQUIDES DU SITE AREVA DU TRICASTIN PENDANT LA PÉRIODE 2008-2013 (GBq/an)



Après traitement et contrôle du niveau d'activité, les effluents issus des procédés sont dirigés vers le canal de Donzère-Mondragon, à l'est du site. En 2013, les rejets liquides radioactifs du site se composent essentiellement d'isotopes de l'uranium, dont 5,9 GBq environ sont rejetés annuellement dans le canal. AREVA NC est le principal établissement contributeur à ce rejet d'uranium. Les radionucléides artificiels font également partie des rejets aqueux du site AREVA du Tricastin, comme le ^{14}C (0,32 GBq), le tritium (0,03 GBq), d'autres produits de fission (0,16 GBq) et des transuraniens (0,016 GBq).

La surveillance de l'environnement du site du Tricastin

Pour assurer la surveillance de la radioactivité dans l'environnement du site du Tricastin, AREVA s'appuie sur un réseau de prélèvements en milieu aquatique et terrestre, il s'agit du Réseau de Surveillance de l'Environnement (RSE). Ainsi, dans le Canal de Donzère-Mondragon, des prélèvements d'eau de surface sont réalisés en amont et en aval des rejets où la concentration volumique en uranium et en tritium est mesurée. Les teneurs de ces radionucléides sont également surveillées dans La Gaffière, cours d'eau qui traverse le site et dans le Lac Trop-Long, situé au sud du site. Enfin, AREVA dispose d'un réseau de piézomètres pour prélever l'eau de la nappe phréatique et détecter une éventuelle influence à l'aval hydraulique du site. La surveillance du milieu terrestre s'appuie sur un réseau de points de prélèvement situés sous l'influence potentielle des rejets atmosphériques provenant du site. À ces points, sont prélevés de l'herbe et des denrées agricoles principalement pour la mesure de l'uranium et du tritium.

En complément des mesures réglementaires, AREVA mène une surveillance dite de « deuxième niveau » réalisée ponctuellement, à la demande des autorités ou à l'initiative de l'exploitant, dans le but de renforcer la surveillance réglementaire ou d'améliorer la connaissance de l'environnement. Il s'agit, par exemple, du bilan radioécologique décennal de l'environnement du Tricastin réalisé à l'initiative d'AREVA en 2012 par l'IRSN. Ce bilan présente une cartographie des isotopes de l'uranium, du ^{14}C et du tritium dans les végétaux terrestres prélevés au voisinage du site.

Dans les principaux cours d'eau cités précédemment, l'IRSN réalise également des prélèvements pour détecter une éventuelle influence du site du Tricastin sur les teneurs en uranium de l'eau, des végétaux aquatiques et des sédiments. En complément, les transuraniens sont mesurés dans les sédiments. En milieu terrestre, la surveillance exercée par l'IRSN repose sur des prélèvements d'herbe et de denrées en différents points, pour la mesure de l'uranium, du tritium et du ^{14}C . De plus, entre janvier 2012 et août 2013, des prélèvements d'aérosols et des mesures des isotopes de l'uranium ont été réalisés par l'IRSN au sud-est du site en utilisant les techniques les plus performantes¹.

Enfin, en janvier 2014, l'IRSN a réalisé des prélèvements de végétaux (feuilles d'arbres et herbe) pour évaluer les conséquences d'un rejet incidentel d'uranium appauvri provenant de l'usine W d'AREVA NC.

1. Constat radiologique de la Vallée du Rhône – étude complémentaire du milieu atmosphérique.

L'influence du Tricastin sur l'environnement et l'exposition du public

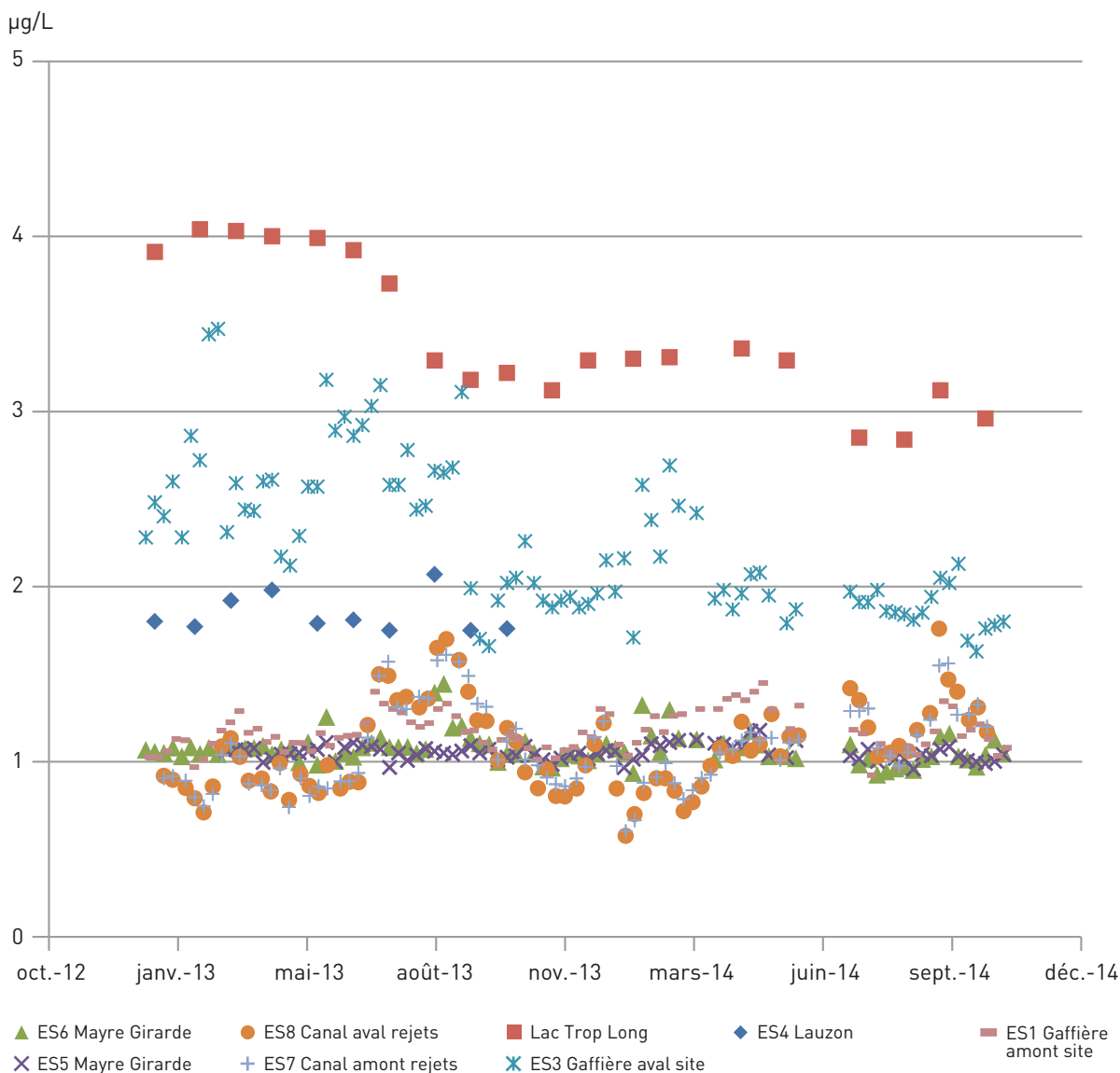
• Les isotopes de l'uranium

Les mesures effectuées sur les aérosols par l'IRSN entre janvier 2012 et août 2013, ont mis en évidence une activité moyenne en ^{238}U de $0,9 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air. De plus, la proportion de ^{235}U et la présence de ^{236}U (isotope artificiel de l'uranium) dans le compartiment atmosphérique témoignent de l'influence locale des rejets des installations d'AREVA Tricastin dans le compartiment atmosphérique.

Résider dans la zone influencée par les rejets atmosphériques située au sud du site conduirait à une dose consécutive à l'inhalation des poussières d'uranium de $0,05 \mu\text{Sv}/\text{an}$.

Dans la Gaffière et le Lauzon, une concentration moyenne plus élevée est observée à l'aval du site ($2,1$ et $1,7 \mu\text{g}/\text{L}$, respectivement, soit une activité moyenne en ^{238}U de $0,026$ et $0,021 \text{Bq}/\text{L}$, respectivement) en comparaison de celle de l'amont ($1,1 \mu\text{g}/\text{L}$ en moyenne) (cf. figure 4). Parmi les eaux de surface mesurées, les eaux du Lac Trop-Long sont de loin les eaux les plus marquées par l'uranium ($3,6 \mu\text{g}/\text{L}$ en moyenne, correspondant à une activité moyenne en ^{238}U de $0,045 \text{Bq}/\text{L}$).

FIGURE 4 / CONCENTRATION VOLUMIQUE EN URANIUM DANS LES EAUX DE SURFACE PRÉLEVÉES DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE AREVA DU TRICASTIN EN 2013 ET 2014 ($\mu\text{g}/\text{L}$)



Il en est de même pour les sédiments et les végétaux aquatiques. Une activité moyenne des isotopes de l'uranium plus élevée est observée dans les sédiments et les végétaux aquatiques à l'aval du site AREVA (activité moyenne en ^{238}U de 28 Bq/kg dans les sédiments) en comparaison de celle de l'amont (activité moyenne en ^{238}U de 8,2 Bq/kg dans les sédiments). De plus, les analyses révèlent la présence de l' ^{236}U , isotope artificiel de l'uranium, dans les végétaux aquatiques prélevés à l'aval du site AREVA (cf. tableau 2). Ces observations permettent de conclure sans ambiguïté au marquage de la Gaffière (eaux de surface, sédiments et végétaux aquatiques) par l'uranium provenant du site. L'eau de la Gaffière ou du Lac Trop-Long n'est pas consommée par les riverains. Toutefois, si cela se produisait (remplissage d'une gourde, par exemple), la consommation de 1 L conduirait à une dose due à l'uranium de 0,003 $\mu\text{Sv/L}$.

En revanche, les prélèvements et les mesures de l'eau du Canal de Donzère-Mondragon ne font pas apparaître de différence significative entre la concentration en uranium mesurée à l'amont du rejet et celle de l'aval (en moyenne 0,97 et 0,95 $\mu\text{g/L}$, respectivement). Il en est de même des sédiments et des végétaux aquatiques prélevés à l'aval des rejets dans le canal de Donzère-Mondragon, qui ne révèlent aucun marquage en uranium et en transuraniens, les activités moyennes étant similaires à celles observées à l'amont (cf. tableaux 1 et 2).

L'activité en ^{238}U dans l'herbe prélevée dans le réseau de surveillance de l'environnement d'AREVA est faible et peu variable (entre 0,015 et 0,032 Bq/kg sec en moyenne, selon le site de prélèvement), compatible avec les observations réalisées par l'IRSN (activité de ce radionucléide comprise entre 0,06 et 0,026 Bq/kg sec) (cf. tableau 3).

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES DES ISOTOPES DE L'URANIUM, DU PLUTONIUM ($^{239+240}\text{Pu}$) ET DE L'AMÉRICIUM (^{241}Am) DANS LES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS DANS L'ENVIRONNEMENT AQUATIQUE DU SITE AREVA DU TRICASTIN ENTRE 2012 ET 2014 (Bq/kg sec)

Localisation des prélèvements	uranium-234 (Bq/kg sec)	uranium-235 (Bq/kg sec)	uranium-238 (Bq/kg sec)	plutonium-239+240 (Bq/kg sec)	américium-241 (Bq/kg sec)
Canal de Donzère-Mondragon amont rejets	16	0,8	15	0,07	0,1
Canal de Donzère-Mondragon aval rejets	12	0,6	12	0,06	0,07
Gaffière amont site	8,6	0,4	8,2	0,14	0,06
Gaffière aval site	30	1,4	28	0,07	0,34
Lauzon	8,7	0,5	8,7	0,07	0,07

TABLEAU 2 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES DES ISOTOPES DE L'URANIUM DANS LES VÉGÉTAUX AQUATIQUES PRÉLEVÉS DANS L'ENVIRONNEMENT AQUATIQUE DU SITE AREVA DU TRICASTIN ENTRE 2012 ET 2014 (Bq/kg sec)

Localisation des prélèvements	uranium-234 (Bq/kg sec)	uranium-235 (Bq/kg sec)	uranium-236 (Bq/kg sec)	uranium-238 (Bq/kg sec)
Canal de Donzère-Mondragon amont rejets	0,8	0,04	-	0,7
Canal de Donzère-Mondragon aval rejets	0,9	0,03	-	0,8
Gaffière amont site	0,7	0,03	-	0,6
Gaffière aval site	1,2	0,06	0,02	1,0

TABLEAU 3 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES EN ²³⁸U DANS L'HERBE PRÉLEVÉE DANS LE RÉSEAU DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT (Bq/kg sec)

Localisation des prélèvements	uranium-238 (Bq/kg sec)
ID1 Faveyrolles	0,025
ID2 Prés Guérinés	0,026
ID3 Bollène-la-Croisière	0,032
ID4 Lapalud	0,015

Dans le blé prélevé en 2012 à proximité du site AREVA, l'activité en ²³⁸U est également faible (en moyenne de 0,027 Bq/kg sec), dans la fourchette des données acquises par l'IRSN en dehors de l'influence des rejets des installations du cycle du combustible (activité comprise entre 0,011 et 0,17 Bq/kg). Seul un discret marquage par l'²³⁶U, isotope artificiel provenant du site AREVA, est observé dans quelques échantillons de blé et

d'herbe, sans qu'une augmentation significative de l'activité en uranium 238 soit observée dans ces matrices.

En comparaison des eaux de surface, les eaux de la nappe phréatique prélevées dans le voisinage immédiat du site AREVA du Tricastin témoignent d'une concentration volumique moyenne en uranium très homogène, de l'ordre de 1,2 µg/L (cf. figure 5).

FIGURE 5 / CARTOGRAPHIE DE LA CONCENTRATION VOLUMIQUE MOYENNE EN URANIUM DANS L'EAU DE LA NAPPE PRÉLEVÉE DANS DIFFÉRENTS PIÉZOMÈTRES DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE AREVA DU TRICASTIN, EN 2013 ET 2014 (µg/L)



• Le tritium et le carbone 14

L'activité en ^{14}C des anguilles prélevées dans le canal de Donzère-Mondragon en 2011 (81,9 Bq/kg frais), est supérieure au bruit de fond dans le milieu aquatique, de l'ordre de 20 à 25 Bq/kg frais, observable à l'amont des CNPE (Creys-Malville¹). Rappelons que les poissons et mollusques du Rhône, influencés par les rejets en ^{14}C des CNPE du fleuve, témoignent d'une activité croissante de ce radionucléide vers l'aval, avec des valeurs maximales de l'ordre de 160 Bq/kg frais. Ainsi, la mesure dans les anguilles provenant du canal de Donzère-Mondragon ne permet pas de discriminer la part du ^{14}C attribuable aux installations nucléaires du Tricastin, bien que les rejets d'AREVA Tricastin (0,3 GBq) soient plus faibles que ceux du CNPE du Tricastin (43 GBq en 2012).

En milieu terrestre, le marquage des végétaux par le ^{14}C , extrêmement discret et limité à l'environnement proche du site, n'est visible qu'au travers d'un indicateur très sensible : l'activité spécifique¹. Elle est en moyenne de 245 Bq/kg C en 2012, soit légèrement supérieure à la valeur attendue en dehors de l'influence des rejets, de l'ordre de 232 Bq/kg C (cf. figure 7). S'il n'est pas possible de discriminer la part de cette activité ajoutée imputable aux rejets d'AREVA, il faut noter que ceux-ci, d'une valeur de 3,1 GBq/an, sont près de 200 fois inférieurs à ceux du CNPE d'EDF voisin (570 GBq/an).

Cette prédominance probable de l'influence des rejets du CNPE d'EDF dans les activités environnementales mesurées est encore plus sensible pour le tritium. Ainsi, les mesures de l'activité en tritium dans les eaux du canal de Donzère-Mondragon effectuées par AREVA et l'IRSN entre

2011 et 2014 donnent des valeurs moyennes très proches l'une de l'autre : 4,6 et 3,8 Bq/L, respectivement (cf. figure 6), et également proches des valeurs synthétisées récemment par l'IRSN² pour cette portion du Rhône (4,7 Bq/L en moyenne à l'aval du Tricastin). Ces activités sont principalement dues aux rejets d'EDF (cf. page 72). En effet, les rejets de tritium d'AREVA (0,03 GBq en 2012) sont infimes au regard des rejets du seul CNPE d'EDF voisin (48 500 GBq en 2012). De plus, les CNPE situées en amont constituent d'autres sources de ce radionucléide très mobile mesuré dans l'eau. En milieu terrestre, les activités mesurées dans les végétaux prélevés dans l'environnement immédiat au nord et au sud du site (tritium organiquement lié de l'ordre de 10 Bq/L d'eau de combustion, en 2012), témoignent d'une influence discrète du site qui, à la différence du ^{14}C , subsiste à plus grande distance (> 1 km), au sud des sites (tritium organiquement lié : 8 à 11 Bq/L d'eau de combustion). L'activité en tritium dans les denrées est globalement faible : en moyenne de 13 Bq/L d'eau de combustion dans le lait de chèvre provenant de Bollène, 2,6 et 3,9 Bq/L d'eau de combustion dans les salades et les pêches, respectivement. En tout état de cause, les activités en tritium dans les denrées sont celles attendues dans un environnement très peu à non influencé par les rejets.

• Les transuraniens

Les sédiments de la Gaffière présentent des activités de ^{241}Am plus élevées en aval (activité moyenne de 0,34 Bq/kg sec) qu'en amont du site (activité moyenne de 0,06 Bq/kg sec) (cf. tableau 1). En revanche, aucune différence significative n'est observée entre les activités en transuraniens mesurées à l'aval et celles de l'amont dans les sédiments du canal de Donzère-Mondragon.

1. Voir focus ^{14}C dans les poissons d'eau douce.

2. Constat Vallée du Rhône. Rapport final relatif au milieu aquatique - Rapport IRSN/PRP-ENV/SESURE 2013-17.

FIGURE 6 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES EN TRITIUM DANS L'EAU DU CANAL DE DONZÈRE-MONDRAGON, À L'AVAL DES REJETS DU SITE AREVA DU TRICASTIN ENTRE 2011 ET 2014 (Bq/L)

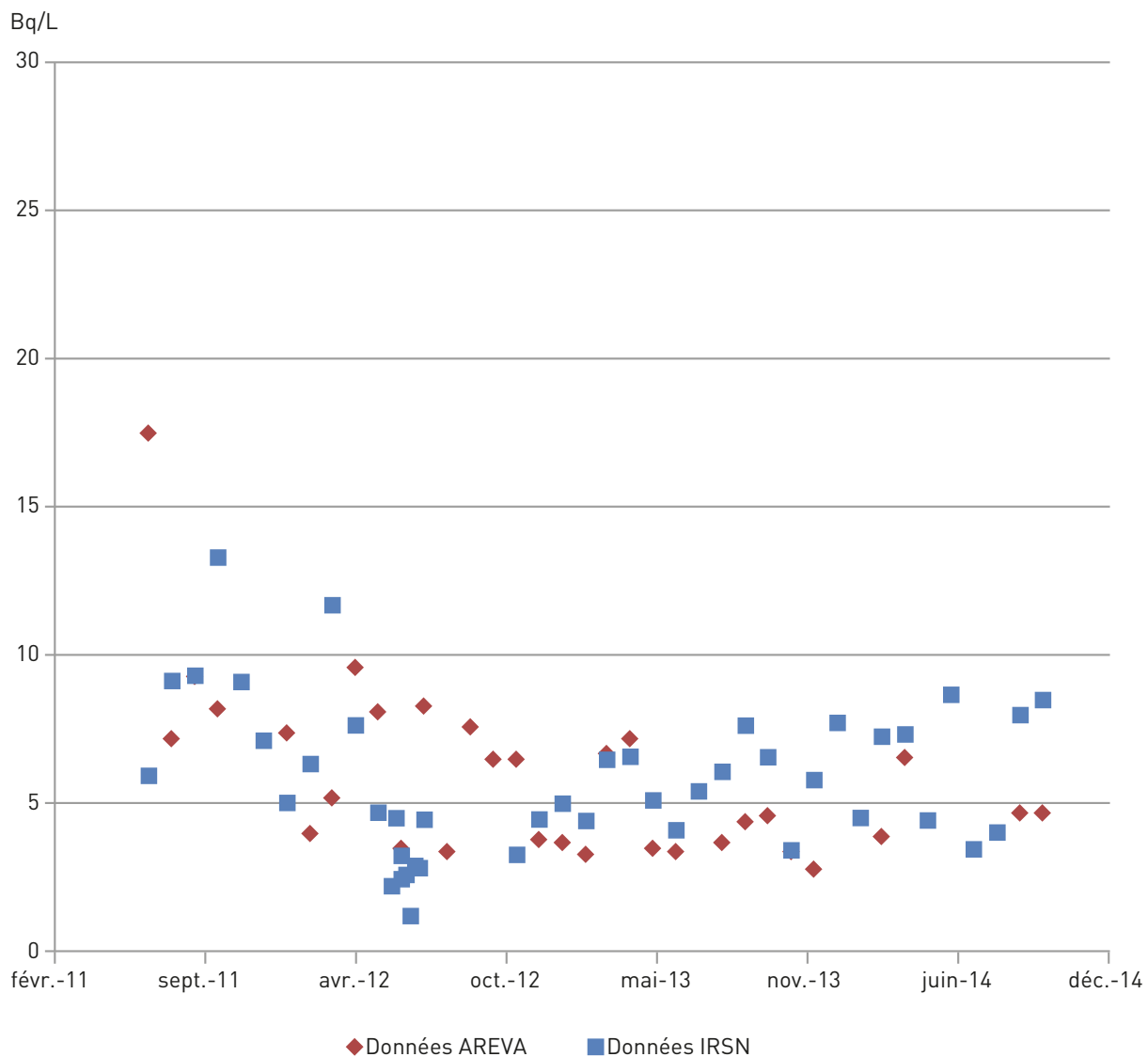
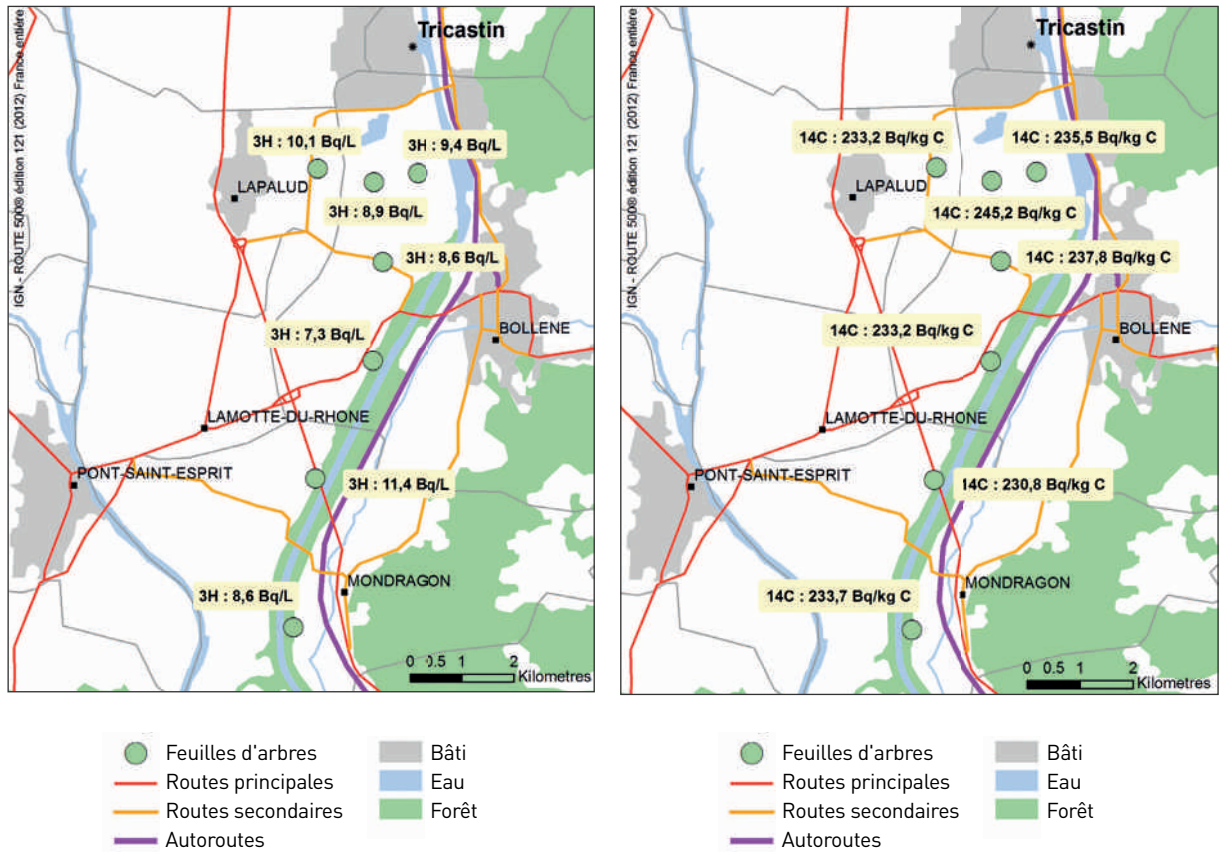


FIGURE 7 / ACTIVITÉS EN TRITIUM LIÉ (Bq/L d'eau de combustion, à gauche) ET EN ¹⁴C (Bq/kg de C, à droite) DANS LES FEUILLES DE PEUPLIER, EN 2012 – DONNÉES IRSN/AREVA



Conclusion

Les réseaux de balises de mesure du débit de dose n'ont décelé aucune anomalie autour du site du Tricastin sur la période d'observation (de juin 2011 à décembre 2014).

Des prélèvements et des mesures ont été réalisés par l'IRSN suite au rejet incidentel de poudre d'uranium appauvri de l'usine W (INB 155), qui survint le 31 octobre 2013. Les données ont montré un marquage des végétaux prélevés en bordure de site par l'uranium appauvri. Les observations sont cohérentes avec les mesures réalisées par AREVA et témoignent d'une augmentation de l'activité en uranium dans les végétaux (jusqu'à 1 Bq/kg sec en ^{238}U dans l'herbe), par rapport aux mesures acquises avant le rejet citées plus haut. La zone concernée étant inhabitée et située en bordure immédiate du site, cet événement a été sans conséquence pour la population.

L'influence du site AREVA du Tricastin perceptible au travers de mesures environnementales, est discrète et se limite essentiellement à l'uranium

dans l'air et dans le cours d'eau de la Gaffière. Les activités mesurées dans l'air par l'IRSN pourraient conduire à une dose par inhalation de l'ordre de 0,05 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette dose est de 2,4 fois plus faible que celle calculée par modélisation par AREVA sur la base des activités rejetées (0,12 $\mu\text{Sv}/\text{an}$). Ces estimations calculatoires montrent que cette dose liée à l'inhalation d'uranium représenterait près de 40 % de la dose totale susceptible de résulter des rejets des installations d'AREVA.

En raison des rejets du CNPE d'EDF implanté sur le site, l'influence des rejets atmosphériques de carbone 14 d'AREVA qui pourrait constituer la seconde contribution à cette dose totale, ne peuvent être discernés dans les résultats des mesures environnementales.

Les activités en tritium mesurées dans l'eau du canal de Donzère-Mondragon, et celles de carbone 14 mesurées dans les poissons de ce canal, résultent principalement des rejets liquides d'EDF, du CNPE du Tricastin mais aussi des CNPE situés en amont.



Vue aérienne du site du Tricastin

© DR

Le site de Romans-sur-Isère

Localisé dans la vallée de l'Isère (cf. figure 1), Le site de Romans-sur-Isère comporte deux installations nucléaires de base. La première installation (INB63) est spécialisée dans la fabrication d'éléments de combustible pour les réacteurs de recherche. La seconde installation (INB98) est l'unité de fabrication des combustibles nucléaires destinés aux réacteurs à eau sous-pression. Ainsi, en 2013, cette INB a transformé 681 tonnes d'uranium enrichi en assemblages de combustible.

Rejets et plan de surveillance

Les effluents liquides qui contiennent potentiellement de l'uranium (comme les eaux de procédé, les eaux de lavage des sols, les effluents de la laverie, etc.), sont dirigés vers une station de traitement des eaux. À l'issue du traitement des eaux, les principaux radionucléides rejetés dans l'Isère sont les isotopes de l'uranium. Les activités des produits

de fission et des transuraniens sont inférieurs aux seuils de décision indiqués dans la figure 2. Ces radionucléides sont également rejetés dans l'atmosphère par les cheminées des installations (cf. figure 3). Les rejets des isotopes de l'uranium sont en légère diminution depuis 2010.

Le plan de surveillance réglementaire a pour objectif de mesurer ces radionucléides dans les différentes matrices de l'environnement terrestre et aquatique. Ainsi, en milieu aquatique, des prélèvements d'eau de surface, de sédiments, de mousses, de roseaux et de poissons sont réalisés dans l'Isère, à l'amont et à l'aval des rejets (cf. figure 1). Dans le milieu terrestre, des végétaux (feuilles d'arbres, herbe, mousses terrestres) et des denrées (blé) sont prélevés dans les zones influencées par les rejets atmosphériques du site (sud et nord du site) et en dehors de l'influence des rejets. En complément, des prélèvements (aérosols et feuilles d'arbres) et des mesures sont également effectués sur le site, aux quatre points cardinaux pour évaluer les conséquences des rejets atmosphériques à proximité des installations.

FIGURE 1 / LOCALISATION DU SITE AREVA DE ROMANS-SUR-ISÈRE ET DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT DANS LE CADRE DE LA SURVEILLANCE DES REJETS DANS L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE ET AQUATIQUE

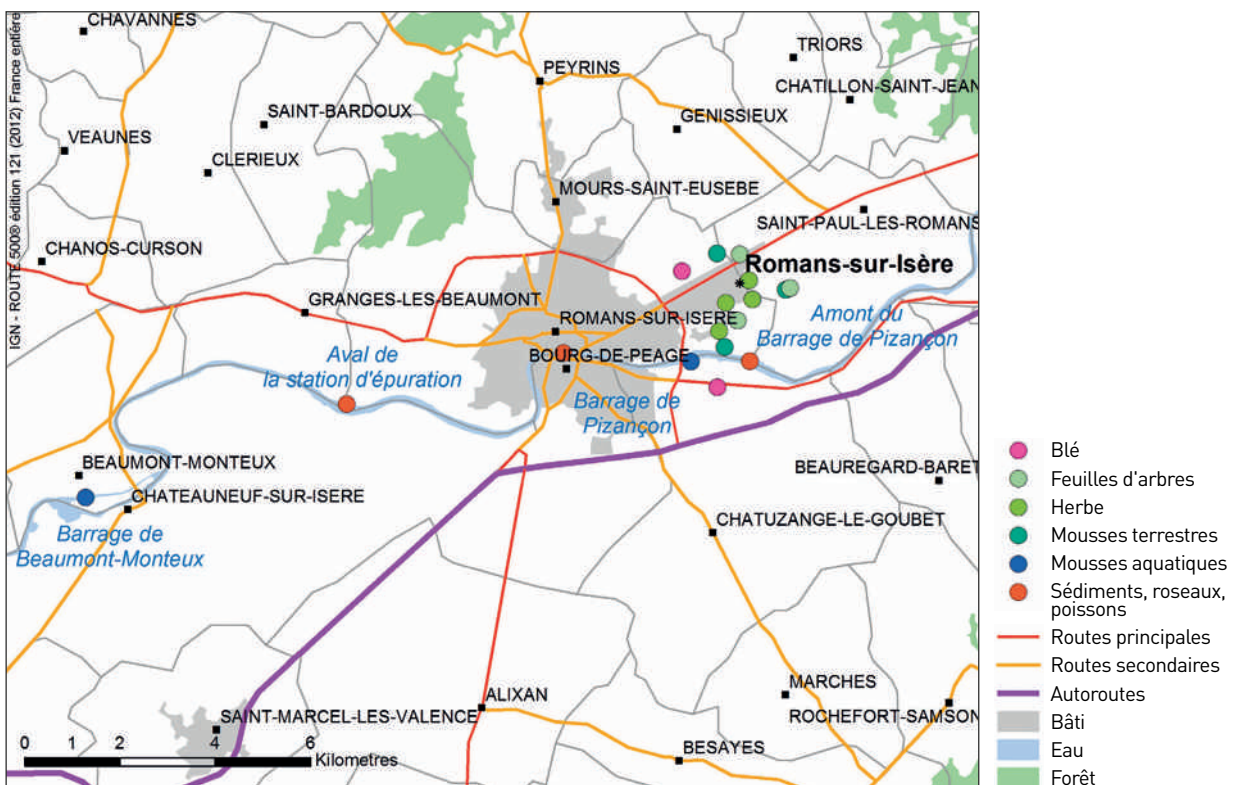


FIGURE 2 / CHRONIQUE DES REJETS LIQUIDES DU SITE AREVA DE ROMANS-SUR-ISÈRE (GBq/an)

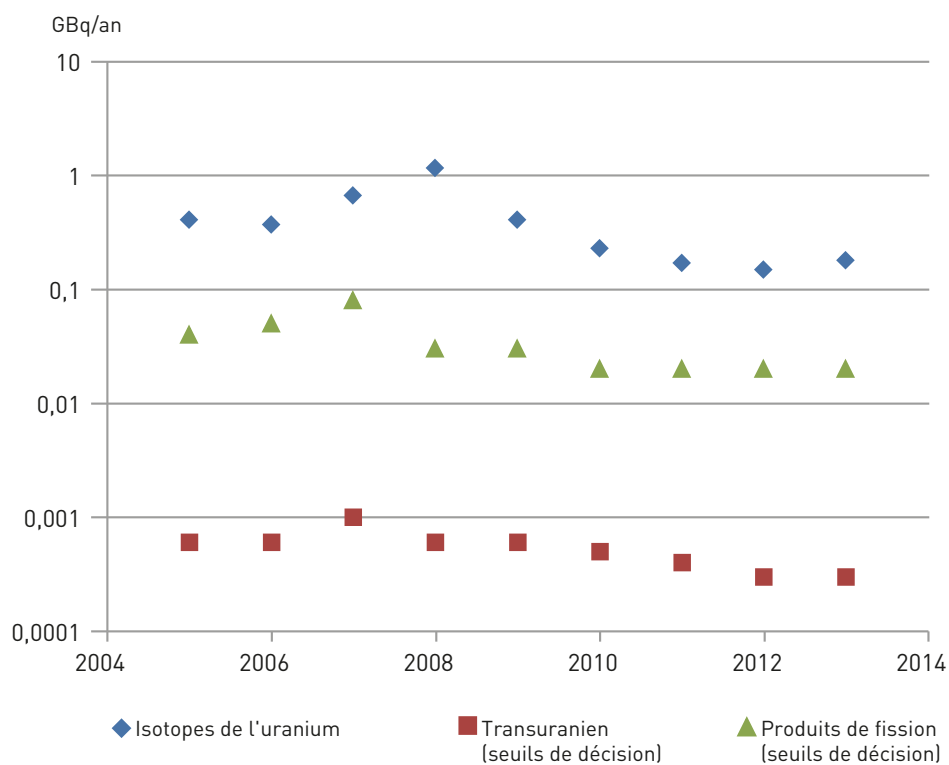
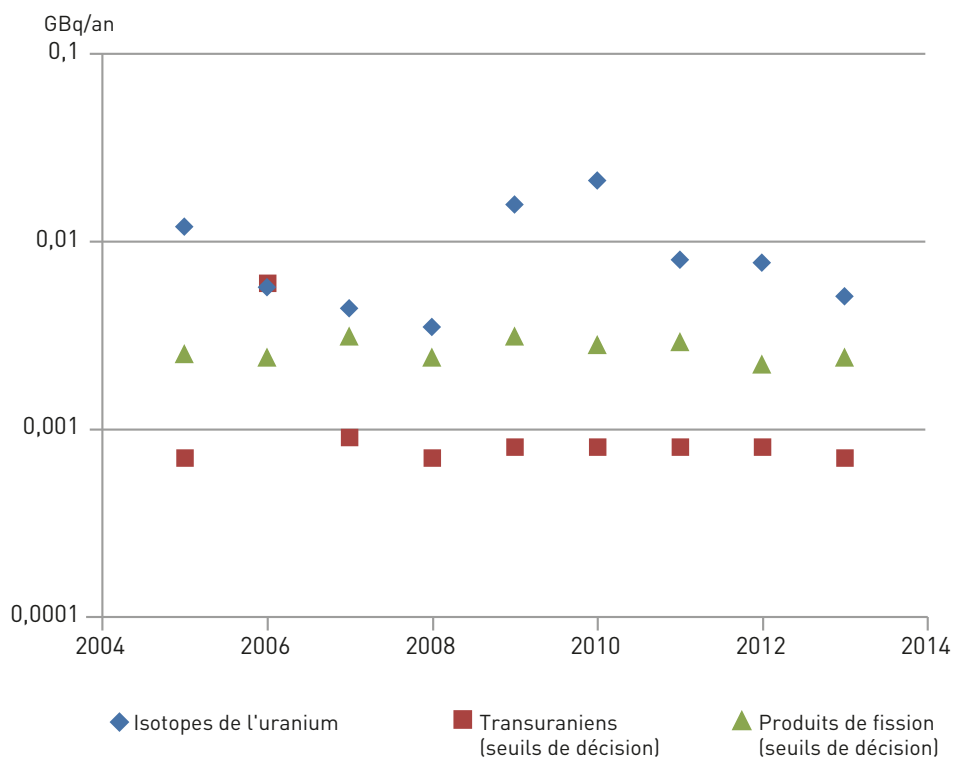


FIGURE 3 / CHRONIQUE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES DU SITE AREVA DE ROMANS-SUR-ISÈRE (GBq/an)

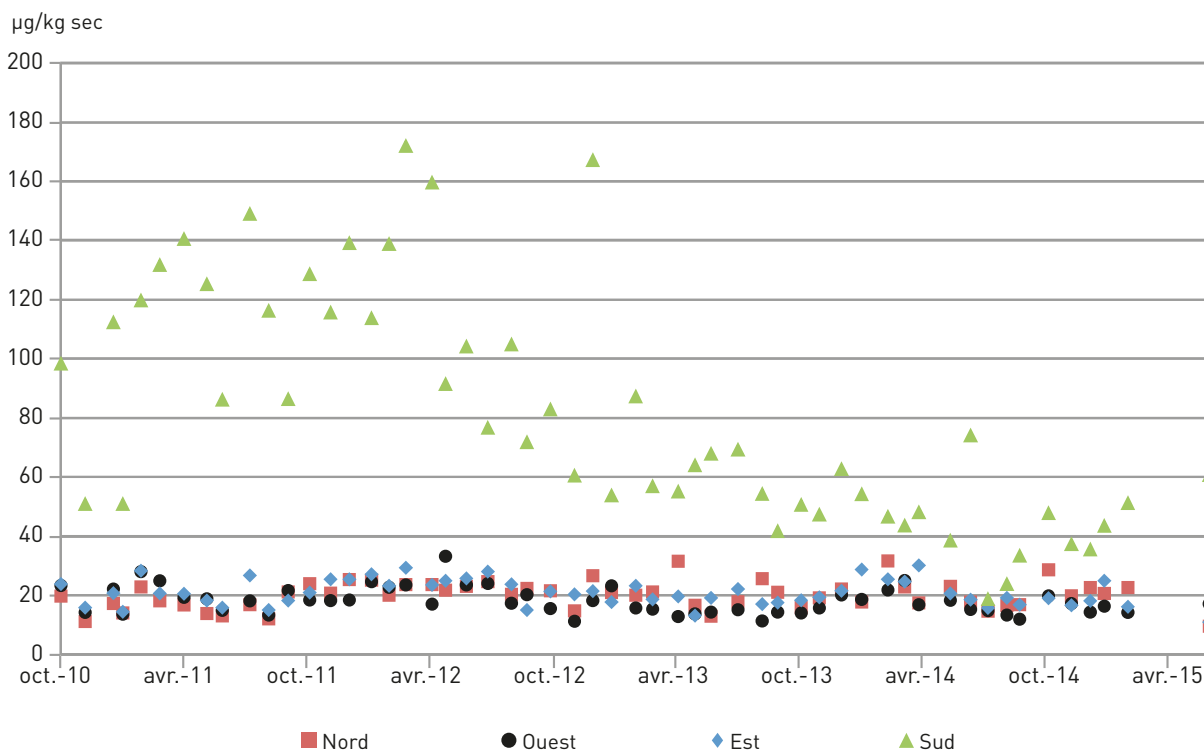


Influence du site de Romans-sur-Isère sur l'environnement et exposition du public

Dans les feuilles d'arbres, la concentration en uranium la plus élevée est mesurée au sud du site avec une concentration moyenne de 45 µg/kg sec (cf. figure 4). Dans les autres parties

du site, la concentration moyenne en uranium est plus faible, entre 14 et 18 µg/kg sec à l'ouest et à l'est du site, respectivement. Ces activités proviennent du dépôt sur les feuilles des arbres des aérosols rejetés dans l'atmosphère.

FIGURE 4 / CONCENTRATION EN URANIUM PONDÉRAL DANS LES FEUILLES D'ARBRES PRÉLEVÉES SUR LE SITE AREVA DE ROMANS-SUR-ISÈRE ET DANS L'ENVIRONNEMENT DE CE SITE, ENTRE 2011 ET 2014 (µg/kg sec)



En effet, l'activité moyenne des isotopes de l'uranium observée sur les aérosols prélevés sur le site est comprise entre 14 et 18 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ et entre 0,90 et 1,15 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour l' ^{234}U et l' ^{238}U , respectivement (cf. tableau 1). Ces valeurs sont à comparer au niveau de l'activité de l'uranium observé en France en dehors de l'influence des installations du cycle du combustible : de l'ordre de 0,1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air en ^{234}U et ^{238}U . Les concentrations des feuilles

d'arbres prélevées en dehors du site sont plus faibles et varient selon la direction et la distance au site, entre 7,5 et 14,3 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$. Dans les autres végétaux prélevés dans l'environnement du site, la concentration moyenne en uranium est plus faible et plus homogène, comme par exemple dans l'herbe et dans le blé (uranium compris entre 3,7 et 6,0 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$ et entre 1,3 et 7,0 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$, respectivement) (cf. tableau 2).

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS MOYENNES DES ISOTOPES DE L'URANIUM DANS LES AÉROSOLS PRÉLEVÉS SUR LE SITE AREVA DE ROMANS-SUR-ISÈRE ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)

	^{234}U $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$	^{235}U $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$	^{236}U $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$	^{238}U $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
E	15	0,43	0,30	1,54
N	16	0,37	0,32	1,46
W	14	0,33	0,29	1,50
S	18	0,53	0,38	2,14

TABLEAU 2 / CONCENTRATION EN URANIUM PONDÉRAL DANS LES VÉGÉTAUX PRÉLEVÉS DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE AREVA DE ROMANS-SUR-ISÈRE ($\mu\text{g}/\text{kg sec}$)

	Localisation des prélèvements	Nord	Est	Sud	Ouest
Herbe	distance site (m)	200	200	750	1200
	uranium ($\mu\text{g}/\text{kg sec}$)	5,7	4,3	6,0	3,7
Mousses terrestres	distance site (m)	750	1000	1250	
	uranium ($\mu\text{g}/\text{kg sec}$)	120	135	127	
Blé	distance site (m)		200	2000	750
	uranium ($\mu\text{g}/\text{kg sec}$)		2,7	1,3	7,0

Les analyses de l'eau de l'Isère prélevée à l'aval du rejet ne révèlent aucune augmentation de la concentration en uranium par rapport aux prélèvements réalisés à l'amont. En effet, les concentrations moyennes en uranium pondéral sont très proches à l'amont et à l'aval (1,52 et 1,54 µg/L, respectivement). La nappe phréatique témoigne de concentrations pondérales moyennes en uranium du même ordre de grandeur que les eaux de surface (0,45 à 1,78 µg/L) avec des variations sans doute liées à la nature des aquifères.

Les analyses des isotopes de l'uranium effectuées dans les matrices prélevées dans l'Isère ne révèlent aucun excès des isotopes de l'uranium dans les échantillons provenant de l'aval du rejet par rapport aux échantillons provenant de l'amont

(cf. tableau 3). Ainsi, dans les mousses aquatiques et les poissons, des activités similaires en ²³⁸U sont mesurées à l'amont et à l'aval (²³⁸U dans les mousses : 4,8 et 3,8 Bq/kg frais, respectivement). De plus, les analyses effectuées en milieu aquatique ne révèlent pas de présence de l'²³⁶U, isotope artificiel de l'uranium.

En conséquence des activités environnementales mesurées, l'uranium dans l'air constitue la principale source d'exposition potentielle des populations riveraines aux rejets atmosphériques provenant du site. Résider dans la zone influencée par les rejets atmosphériques de l'usine conduirait à une dose maximale consécutive à l'inhalation des poussières d'uranium de 0,5 µSv/an.

TABLEAU 3 / ACTIVITÉS MOYENNES DES ISOTOPES DE L'URANIUM MESURÉES DANS LES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS DANS L'ISÈRE À L'AMONT ET À LAVAL DE L'ÉMISSAIRE DES REJETS DU SITE AREVA DE ROMANS-SUR-ISÈRE (Bq/kg frais)

		Amont rejet 1,5 km	Amont rejet 250 m	Aval rejet 2,5 km	Aval rejet 6 km	Aval rejet 9 km
		Amont Barrage Pizançon	Barrage Pizançon	Centre-ville Romans-sur-Isère	Aval STEP Romans-sur-Isère	Barrage de Beaumont-Monteux
Roseaux (Bq/kg frais)	²³⁴ U	< 0,13		< 0,10	< 0,11	
	²³⁵ U	0,0004		0,00012	0,0004	
	²³⁶ U	< 0,0013		< 0,0012	< 0,0012	
	²³⁸ U	0,0036		0,0015	0,009	
Mousses aquatiques (Bq/kg frais)	²³⁴ U		0,9			1,1
	²³⁵ U		0,25			0,15
	²³⁶ U		< 0,005			< 0,007
	²³⁸ U		4,8			3,8
Sédiment (Bq/kg frais)	²³⁴ U	7,6		13	8,5	
	²³⁵ U	0,3		0,3	0,3	
	²³⁶ U	< 0,1		< 0,1	< 0,1	
	²³⁸ U	5,5		6,8	6,9	
Poissons (Bq/kg frais)	²³⁴ U	< 0,15		< 0,15	< 0,11	
	²³⁵ U	0,0013		0,0002	0,00009	
	²³⁶ U	< 0,002		< 0,002	< 0,001	
	²³⁸ U	0,02		0,002	0,002	



© DR

Vue aérienne du site de Romans-sur-Isère



© DR

Prélèvement d'eau dans l'Isère près de Romans

Le site de La Hague

Les installations du centre d'Areva de La Hague assurent la première étape du recyclage des combustibles usés provenant des réacteurs nucléaires. Le site jouxte le Centre de Stockage de déchets radioactifs de la Manche (CSM) de l'ANDRA (cf. figure 1). Entre 1969 et 1994, le CSM a accueilli près de 530 000 m³ de déchets. La surveillance radiologique étant commune à ces deux sites, elle est restituée dans un seul et même chapitre de ce bilan radiologique.

Les rejets

La figure 2 présente les activités des principaux radionucléides rejetés dans les effluents gazeux du centre d'AREVA de La Hague. Les activités rejetées annuellement sont assez constantes dans le temps depuis la fin des années 1990. Le krypton 85 prédomine très largement, devant le tritium et le carbone 14. L'iode 129 vient ensuite comme principal contributeur aux rejets d'iodes. Les autres radionucléides émetteurs β - γ parmi lesquels figurent notamment le ruthénium 106 et l'antimoine 125 sont rejetés à des activités beaucoup plus faibles, trop faibles pour être mesurées, et dont les valeurs indiquées dans les figures 2 et 3 correspondent à des sommes de seuils de décision. C'est également le cas des émetteurs α (isotopes du plutonium).

C'est le tritium qui prédomine très largement dans les activités rejetées par voie liquide, suivi

par le carbone 14, puis par l'iode 129 principal contributeur aux rejets d'iodes (cf. figure 3). Les rejets de ces trois radionucléides sont assez constants dans le temps depuis les années 90. En revanche, les rejets liquides de nombreux radionucléides émetteurs β - γ ont fortement diminué à partir de 2007 : de 10 à près de 100 fois. C'est le cas plus particulièrement du ruthénium 106, du strontium 90, du césium 137 et du cobalt 60.

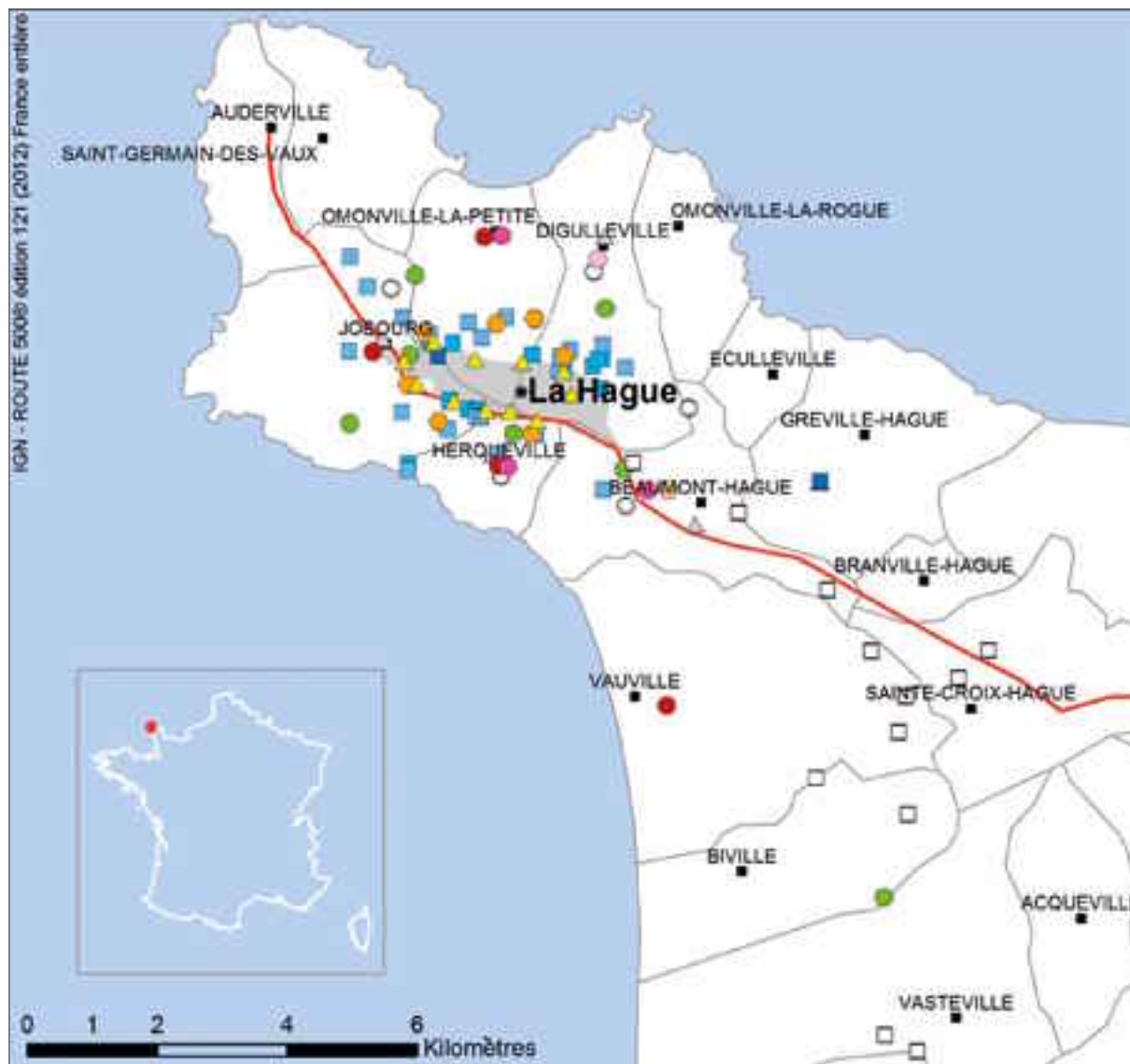
Les eaux de drainage du CSM, aujourd'hui couvert et végétalisé, sont collectées et envoyées vers le site AREVA pour rejets en mer. Les activités concernées sont négligeables au regard de celles d'AREVA.

Les plans de surveillance de l'environnement du site de La Hague

Le tableau 1 fournit le plan de la surveillance réglementaire effectué par AREVA ainsi que celui de l'IRSN dans l'environnement de La Hague. Il s'agit d'un plan de surveillance très étendu compte tenu du nombre de radionucléides à mesurer et de composantes de l'environnement à prélever. Sur l'année 2013, AREVA a ainsi réalisé 22 000 mesures environnementales, auxquelles viennent s'ajouter 4 000 mesures de l'ANDRA et 2 800 mesures de l'IRSN. Par ailleurs, le Laboratoire Départemental d'Analyses de la Manche (LDA 50) et l'Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO) ont également effectué 1 140 et 10 mesures respectivement.



FIGURE 1 / LOCALISATION DU SITE DE LA HAGUE, DES COMMUNES ET DES STATIONS SUR LESQUELLES SONT PRÉLEVÉS LES ÉCHANTILLONS TERRESTRES ET ATMOSPHÉRIQUES



La figure 1 permet de localiser les communes, cours d'eau et stations sur lesquels sont prélevés les échantillons des milieux terrestres, aquatiques continentaux et atmosphériques. La figure 4 permet de localiser les sites de prélèvements marins. Enfin, l'influence des rejets en mer d'AREVA étant décelable au-delà de l'environnement immédiat du site et sur l'ensemble de la Manche, les mesures réalisées par EDF autour des CNPE marins (Flamanville, Penly, Paluel et Gravelines) ainsi que par l'IRSN, permettent également de la caractériser. La figure 4 permet de localiser les zones de prélèvements marins au voisinage des centrales nucléaires de production électrique d'EDF.

Légendes

- | | |
|-----------------------------------|----------------------|
| ▲ Aérosol | ● Légume, fruit |
| ▲ Dose ambiante | ● Viande |
| ■ Eau de pluie | ● Miel, cidre |
| ■ Eau de source et de cours d'eau | ● Sol |
| ■ Eau de nappe | — Routes principales |
| ■ Eau de boisson | ■ Bâti |
| ○ Lait | ■ Eau |
| ● Herbe | ■ Forêt |
| ● Champignons | |

FIGURE 2 / ACTIVITÉS REJETÉES PAR VOIE ATMOSPHÉRIQUE PAR LES INSTALLATIONS D'AREVA-LA HAGUE (TBq/an)

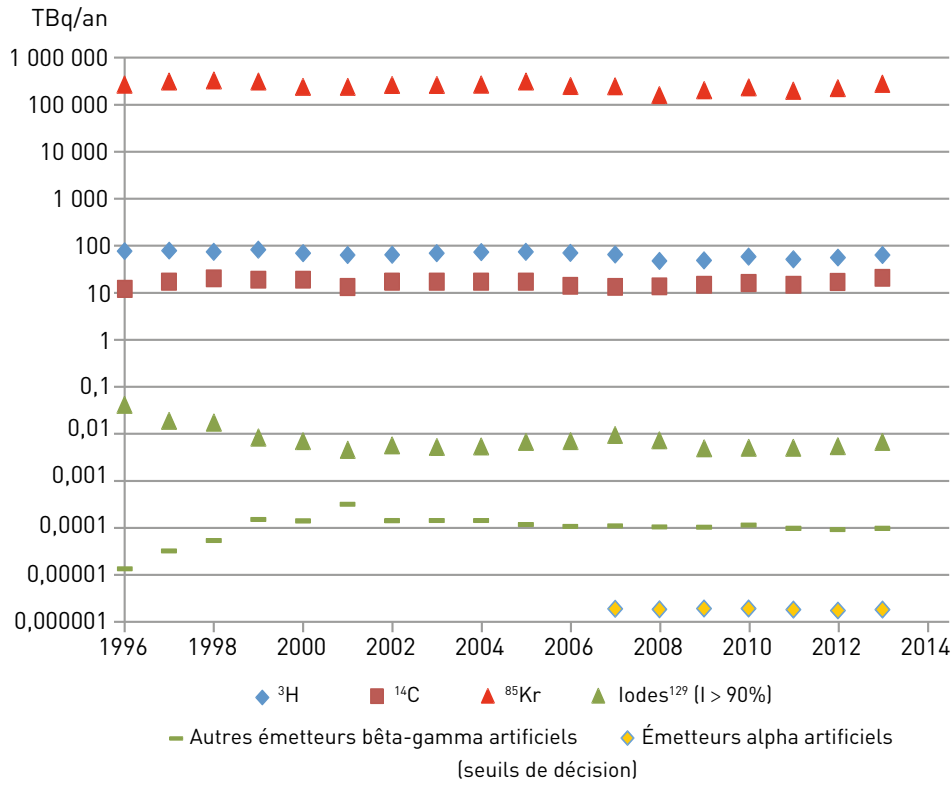


FIGURE 3 / ACTIVITÉS REJETÉES PAR VOIE LIQUIDE PAR LES INSTALLATIONS D'AREVA-LA HAGUE (TBq/an)

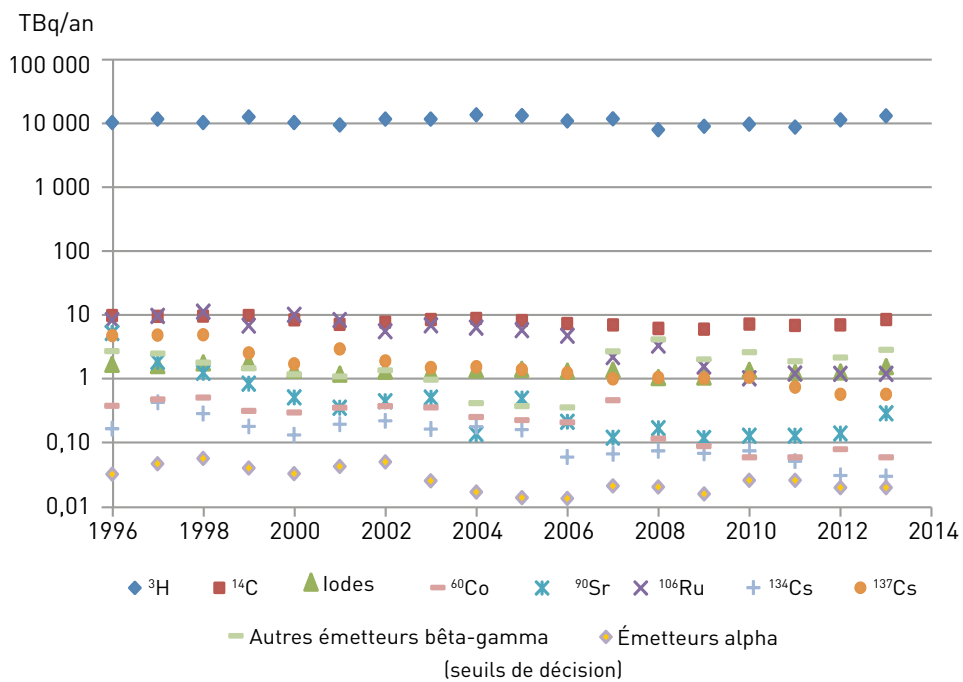
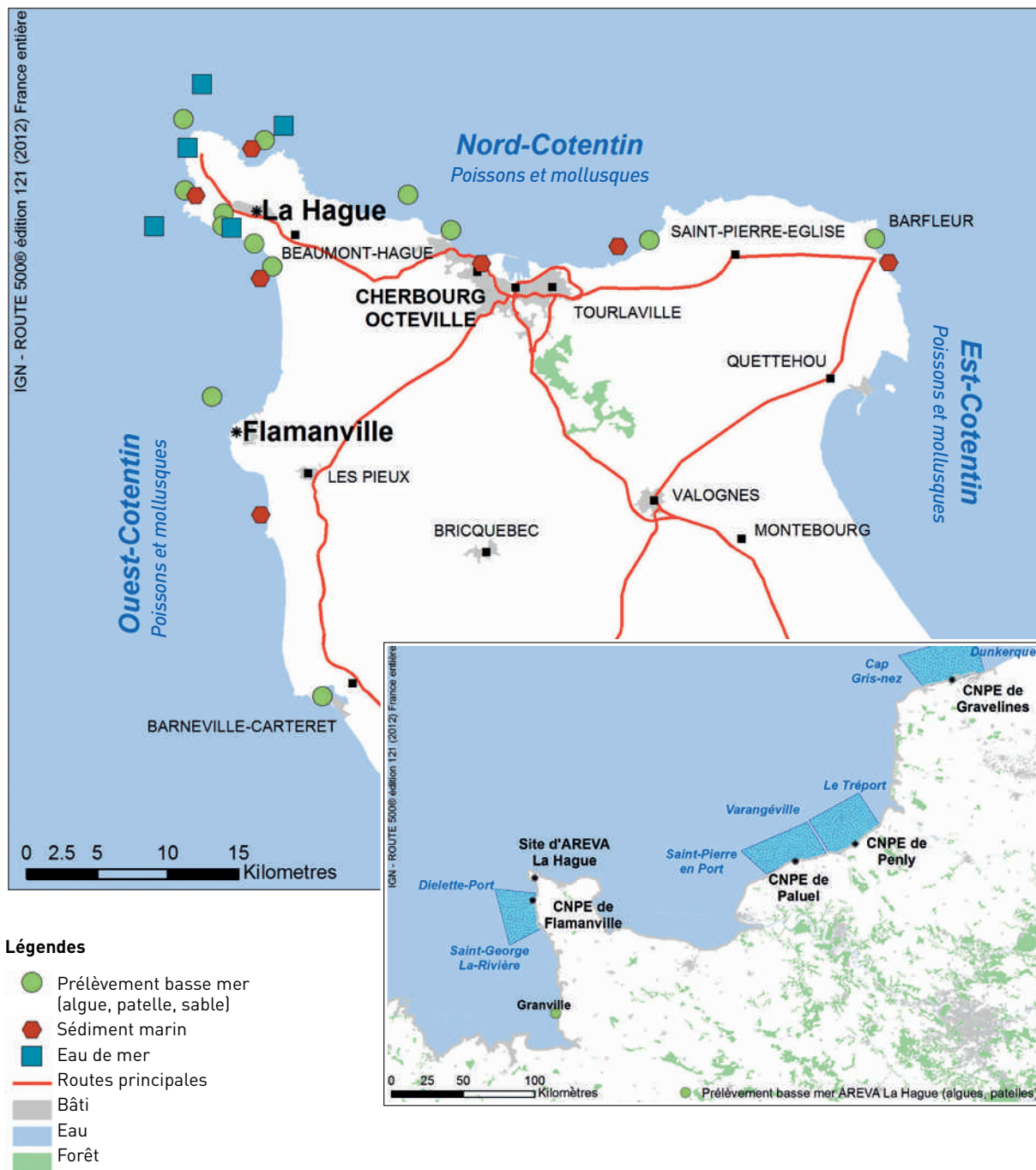


FIGURE 4 / LOCALISATION DES SITES DE PRÉLÈVEMENTS MARINS AUTOUR DE LA HAGUE ET DES SITES EDF DE LA MANCHE



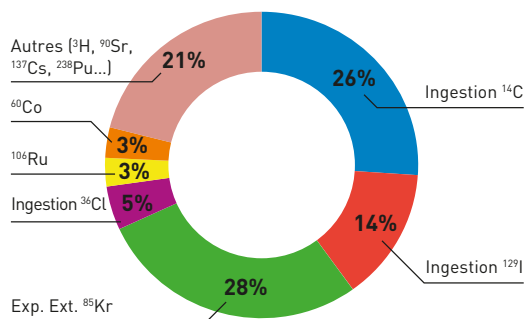
LE GROUPE RADIOÉCOLOGIE NORD-COTENTIN

De 1997 à 2010, les activités dans l'environnement des différents radionucléides résultant du fonctionnement des installations d'AREVA La Hague, ont été examinées dans le cadre d'un groupe d'expertise pluraliste : le Groupe Radioécologie Nord-Cotentin (GRNC). Sur la base de nombreux résultats de mesure et de modèles spécifiquement développés, les doses potentiellement reçues par groupes de la population riveraine ayant des habitudes de vie différentes, ont été évaluées par le GRNC dès 1999. Jusqu'en 2006, des comparaisons régulières entre résultats de modèles et mesures ont permis d'affiner encore ces évaluations. Les rejets étant assez constants depuis, ces doses peuvent être comparées à celles estimées à partir des activités environnementales mesurées ces dernières années (période allant d'avril 2011 à décembre 2014).

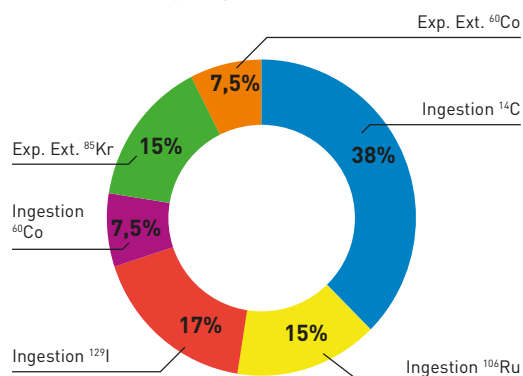
Les graphiques ci-dessous présentent les doses évaluées par le GRNC pour des ensembles de la population environnante du site. Bien que tous les radionucléides présents dans les rejets aient été pris en compte dans ces évaluations, ce sont les radionucléides les plus fréquemment mesurés dans l'environnement et cités précédemment, qui contribuent à la quasi-totalité des doses (à l'exception du tritium en raison de sa très faible radio-toxicité).

FIGURE A / **DOSES LIÉES AUX REJETS DES INSTALLATIONS D'AREVA-LA HAGUE ÉVALUÉES PAR LE GROUPE RADIOÉCOLOGIE NORD-COTENTIN POUR DIFFÉRENTS GROUPES DE LA POPULATION RIVERAINE**

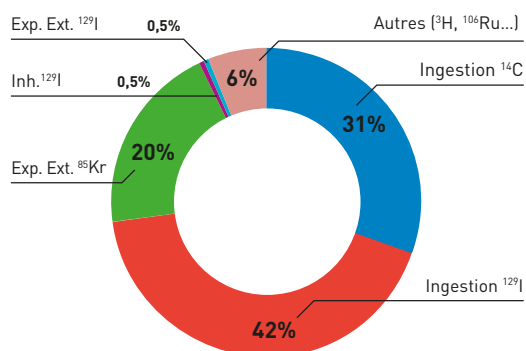
Adulte du canton de Beaumont-Hague (exposition moyenne) : 5 µSv/an



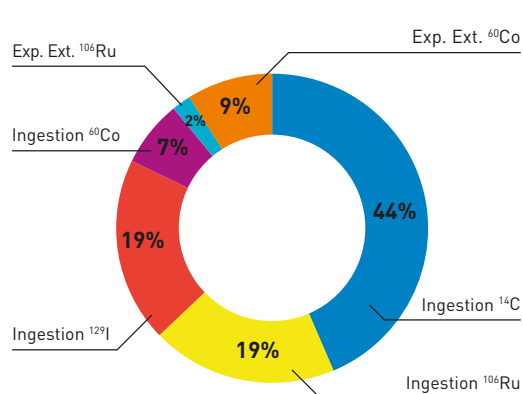
Pêcheur de Goury : 4 µSv/an*



Agriculteur au lieu-dit « Pont Durand » (commune de Digulleville) : 59 µSv/an



Pêcheur des Huquets : 20 µSv/an*



* Les contributions mineures ne sont pas représentées dans les expositions des pêcheurs.

TABLEAU 1 / PLANS DE LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE LA HAGUE EFFECTUÉS PAR AREVA ET PAR L'IRSN

Milieu surveillé ou nature du contrôle	AREVA	IRSN
Air au niveau du sol	5 points de prélèvements ; mesures α et β -global sur filtre quotidienne. Spectrométrie γ si β -global > 2mBq/m ³ . Spectrométrie α sur cumul mensuel de filtres, ³ H hebdomadaire, ¹⁴ C bimensuelle, ⁸⁵ Kr mensuelle	1 station ; mesures spectro. γ , sur filtre hebdomadaire, α global, β global mensuel sur filtre, ³ H bi-mensuelles
Pluie	2 stations pour mesures ³ H libre, spectro. γ	1 station ; mesures ³ H libre mensuelles
Eaux souterraines	53 stations dont une douzaine hors du périmètre du site ; mesures ³ H libre	-
Eaux de consommation	12 stations ; mesures ³ H libre mensuelles	-
Eaux de sources et ruisseaux	7 stations pour mesures ³ H libre, spectro. γ hebdomadaire ou semestrielle	6 points de prélèvement annuels à trimestriels ; mesures ³ H libre, spectro. γ , α global, β global
Sol	7 points de prélèvement ; mesures spectro. γ trimestrielle	-
Herbes	10 points ; mesures ³ H lié, ¹⁴ C, ¹²⁹ I, spectro. γ mensuelle ou trimestrielle, spectro. α annuelle	-
Lait	5 points ; mesures ³ H libre, ¹⁴ C, ¹²⁹ I, spectro. γ mensuelle	3 points de prélèvements à fréquence trimestrielle ; mesures ³ H libre, spectro. γ , ¹²⁹ I, ⁹⁰ Sr
Viande	2 à 3 échantillons par an ; mesures ³ H lié, ¹⁴ C, ¹²⁹ I, spectro. γ , spectro. α	1 prélèvement annuel ; mesures ³ H lié, ¹⁴ C, spectro. γ , ⁹⁰ Sr
Autres denrées (légumes, œufs, miel...)	10 à 12 échantillons par an ; mesures ³ H lié, ¹⁴ C, ¹²⁹ I, spectro. γ , 1 spectro. α /an	1 prélèvement de céréales annuel ; mesures ³ H lié, ¹⁴ C, spectro. γ , ⁹⁰ Sr, spectro. α (Pu/am)
Eau de mer	5 points ; 2 sur la côte, 3 au large ; mesures ³ H libre, ¹⁴ C, ¹²⁹ I quotidienne (Anse des Moulinets), spectro. α mensuelles ou trimestrielles	1 point de prélèvement ; mesures ³ H libre trimestrielles
Plantes de cours d'eau	3 points pour 12 prélèvements par an ; mesures ³ H lié, ¹²⁹ I	-
Algues	6 points de prélèvements pour 24 échantillons par an ; mesures ¹⁴ C, ¹²⁹ I, spectro. γ , spectro. α	3 points de prélèvements à fréquence trimestrielle ; mesures spectro. γ , ⁹⁰ Sr, spectro. α (Pu/am)
Sédiments/Sables de plage	26 points : 10 marins et 13 de basse mer ; mesures spectro. γ , spectro. α trimestrielles	10 points de prélèvement, annuels à trimestriels ; mesures spectro. γ , ⁹⁰ Sr, spectro. α (Pu/am)
Poissons	3 points de prélèvement pour 24 échantillons par an ; mesures ¹⁴ C, ¹²⁹ I, spectro. γ , spectro. α	3 prélèvements annuels ; mesures spectro. γ , ⁹⁰ Sr, spectro. α (Pu/am)
Mollusques	5 et 6 points de prélèvement pour 40 à 50 échantillons par an ; mesures ¹⁴ C, ¹²⁹ I, spectro. γ , spectro. α	3 prélèvements semestriels à trimestriels ; mesures spectro. γ , spectro. α (Pu/am)
Crustacés	3 points de prélèvement pour 12 échantillons par an ; mesures ¹⁴ C, ¹²⁹ I, spectro. γ	-

Influence du site de La Hague sur l'environnement et exposition du public associée

Les radionucléides prépondérants dans les rejets liquides et gazeux des installations du site de La Hague sont également ceux qui sont le plus régulièrement mesurés dans l'environnement et qui présentent les activités les plus élevées. Il s'agit du krypton 85 dans l'air, du carbone 14 et du tritium dans tous les milieux, de l'iode 129 en milieux terrestre et marin. L'exposition de la population avoisinante dépend des niveaux d'activités environnementaux mais également de la radio-toxicité du radionucléide. Il en résulte que la contribution du tritium est infime, alors que celle des actinides émetteurs α (isotopes du plutonium et américium 241) vient juste derrière celles du ^{85}Kr , du ^{14}C et de ^{129}I .

• Le krypton 85

Les rejets atmosphériques de krypton 85 ont pour conséquences des activités dans l'air qui fluctuent entre quelques dizaines et quelques milliers de Bq/m^3 , mais avec des moyennes annuelles assez constantes, de l'ordre de $200 \text{ Bq}/\text{m}^3$ à Jobourg et Gréville-Hague et jusqu'à $650 \text{ Bq}/\text{m}^3$ autour d'Herqueville (cf. figure 5).

Pour les habitants de ces communes, les doses liées aux activités de ^{85}Kr dans l'air mesurées en 2013 vont de $0,6 \mu\text{Sv}/\text{an}$ à Jobourg, $1,1 \mu\text{Sv}/\text{an}$ à Beaumont-Hague et jusqu'à $3,5 \mu\text{Sv}/\text{an}$ à Herqueville. Ces doses sont tout à fait conformes à celles évaluées par le Groupe Radioécologie Nord-Cotentin (GRNC voir encart) : de $1,4 \mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un adulte du canton de Beaumont-Hague à $12 \mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un agriculteur qui habiterait au lieu-dit « Pont-Durand ». Les bouffées de krypton 85 occasionnent régulièrement des augmentations quelquefois importantes mais très fugaces, du débit de dose dans l'air mesuré notamment par les balises Téléray de l'IRSN (cf. figure 5 bis). À la station d'Omonville-La-Petite, le cumul annuel du débit de dose ajouté lors de ces bouffées est de l'ordre de $11 \mu\text{Sv}/\text{an}$, ce qui est tout à fait concordant avec les estimations faites à partir des activités de ^{85}Kr mesurées.

Les rejets de krypton n'ont pas de conséquences sur le milieu terrestre et notamment sur les denrées car c'est un gaz rare qui se dilue dans l'air sans se déposer au sol. Par ailleurs, le ^{85}Kr n'engendre pas d'exposition par inhalation.



Le site de La Hague vu de l'Anse des Moulinets

© DR

FIGURE 5 / MOYENNES TRIMESTRIELLES DES ACTIVITÉS EN KRYPTON 85 MESURÉES MENSUELLEMENT DANS L'AIR AUTOUR DU SITE DE LA HAGUE (Bq/m³) DEPUIS SEPTEMBRE 2009

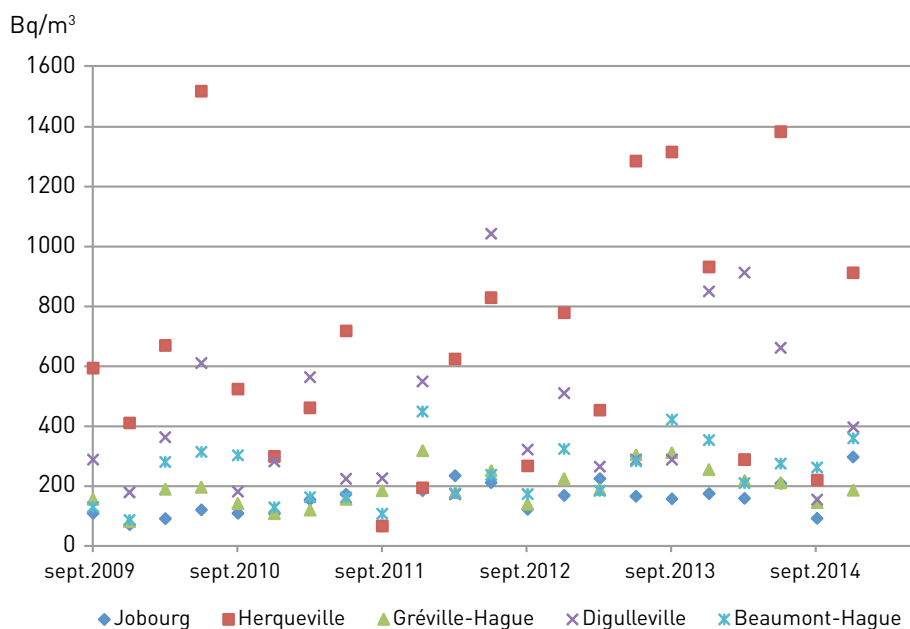
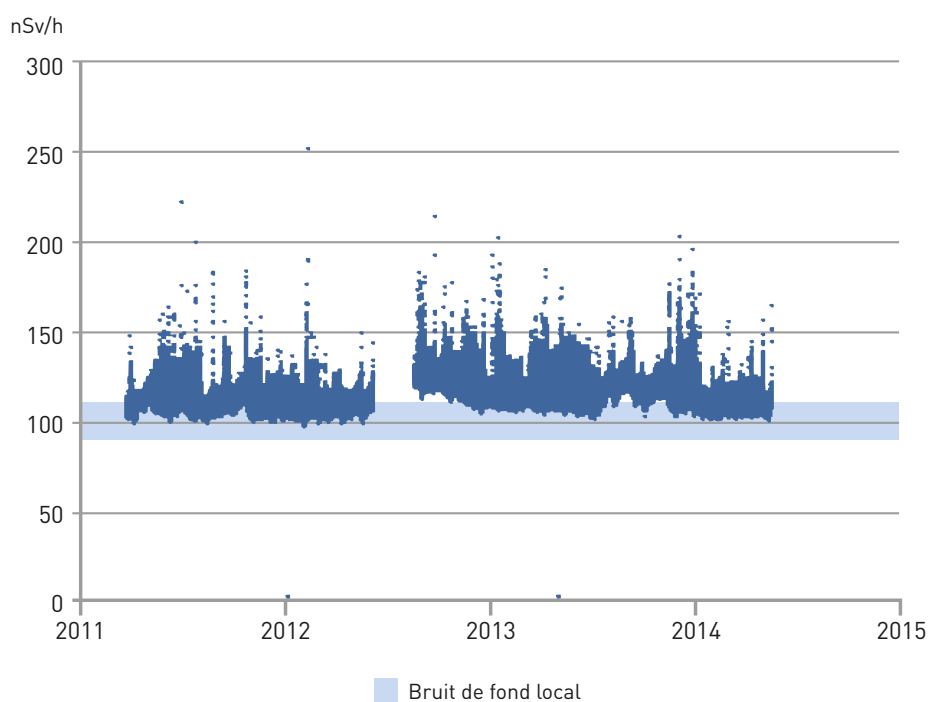


FIGURE 5 BIS / DÉBIT DE DOSE (nSv/h) MESURÉ PAR BALISE DU RÉSEAU TÉLÉRAY D'OMONVILLE-LA-PETITE, VALEUR MOYENNE TOUTES LES 10 MINUTES



• **Le carbone 14**

L'influence des rejets de ^{14}C est visible dans la plupart des composantes de l'environnement et notamment dans les denrées. Elle est très nette dans les denrées marines (poissons, mollusques et crustacés) avec des activités mesurées qui fluctuent entre le bruit de fond essentiellement naturel (de l'ordre de 20 Bq/kg frais ; cf. chapitre 2) et 3 à 4 fois cette valeur (cf. figures 6, 7, 8 et 9). Les moyennes sur la période d'étude sont comprises entre 32 et 48 Bq/kg frais. La variabilité des activités mesurées fait qu'il n'est pas possible de distinguer les denrées marines provenant des différentes zones de prélèvement autour du site (Ouest, Nord et Est-Cotentin). Toutefois, les mesures spécifiques réalisées par l'IRSN (voir le Bilan Radiologique 2012 de l'IRSN) montrent que l'influence des rejets de La Hague est nettement plus marquée à proximité des rejets de l'usine (au niveau d'Auderville notamment) que plus à l'Est



Prélèvement de poisson (plie)

(vers Cherbourg) ou plus au Sud (vers Carteret). Cette influence est par ailleurs visible, mais dans une moindre mesure, sur toutes les côtes françaises de la Manche jusqu'à Dunkerque.

FIGURE 6 / ACTIVITÉS EN CARBONE 14 DES POISSONS PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS JANVIER 2009 (Bq/kg frais)

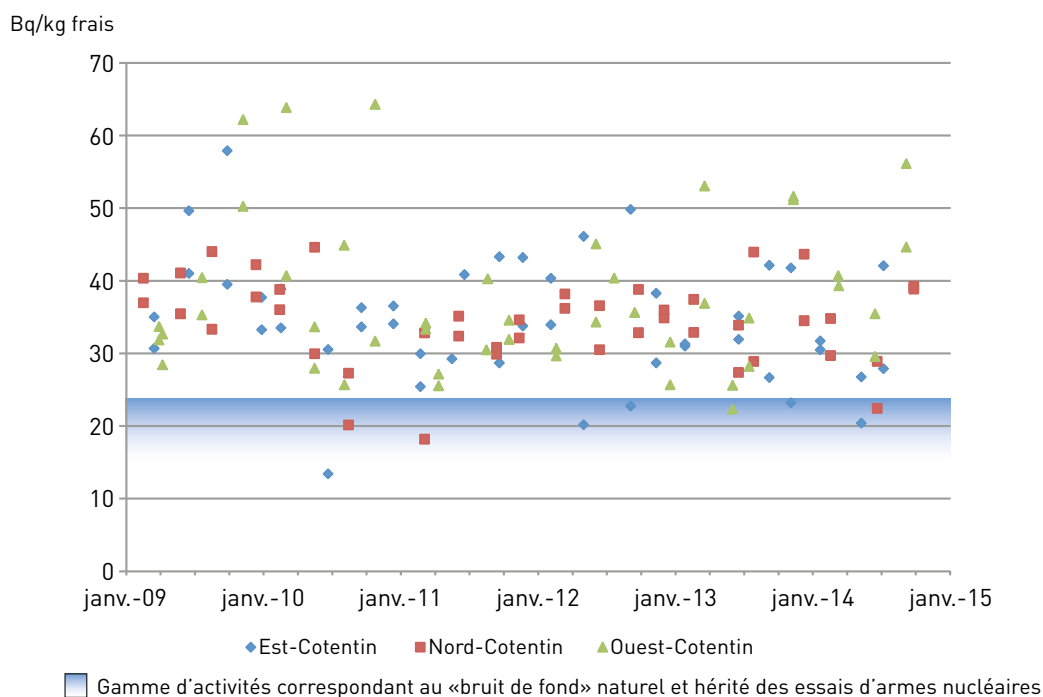


FIGURE 7 / ACTIVITÉS EN CARBONE 14 DES CRUSTACÉS PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS JANVIER 2009 (Bq/kg frais)

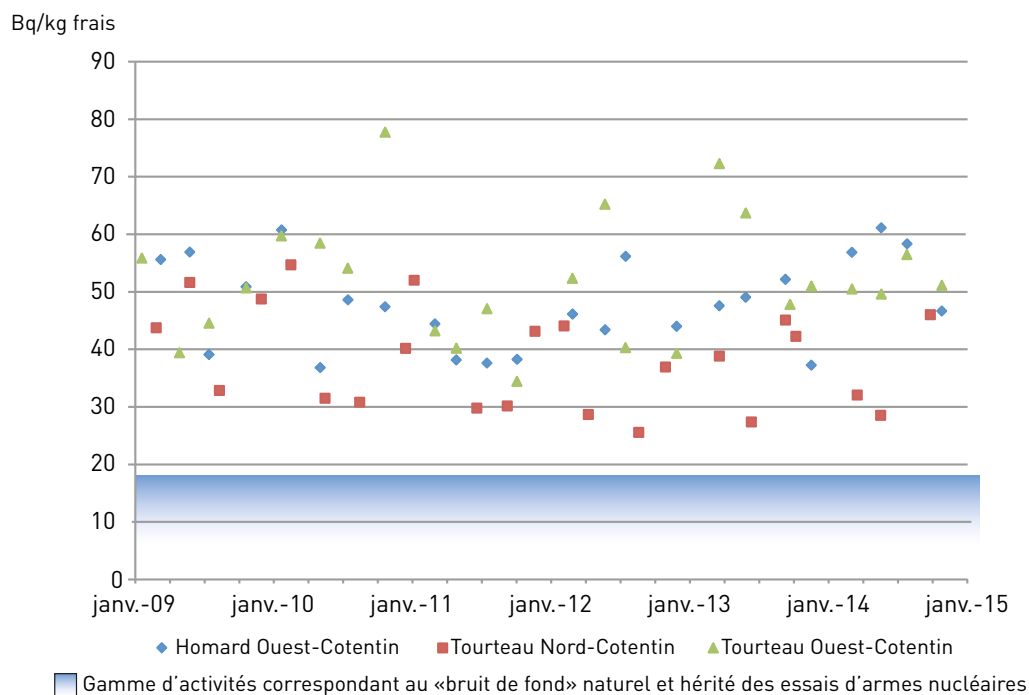


FIGURE 8 / ACTIVITÉS EN CARBONE 14 DES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS JANVIER 2009 (Bq/kg frais)

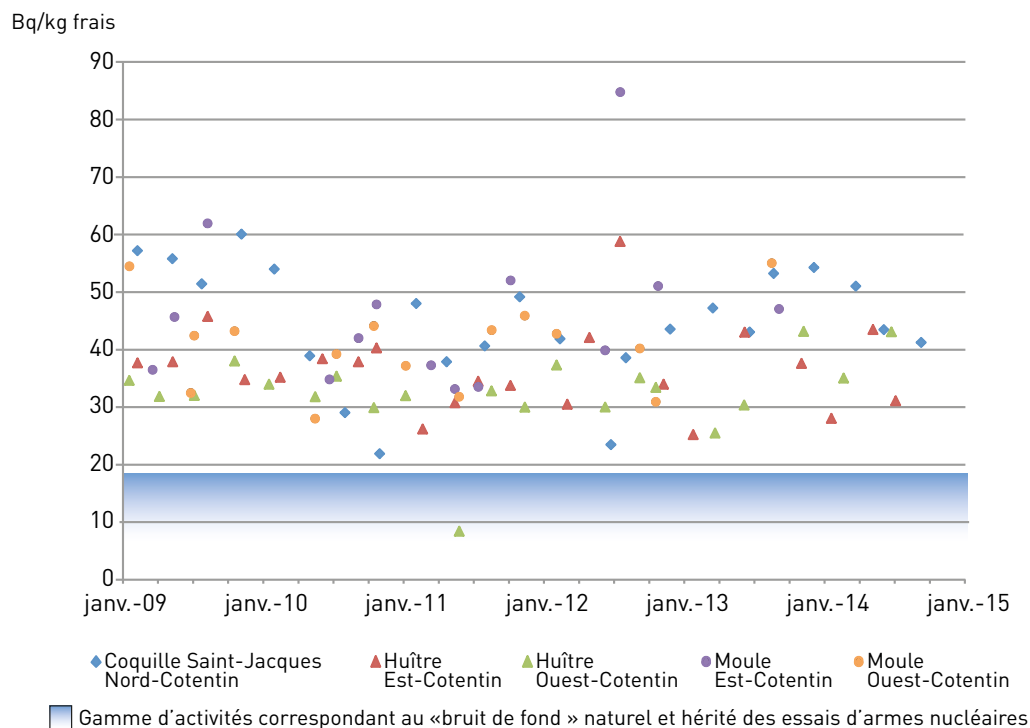


FIGURE 9 / ACTIVITÉS EN CARBONE 14 DES PATELLES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS JANVIER 2009 (Bq/kg frais)

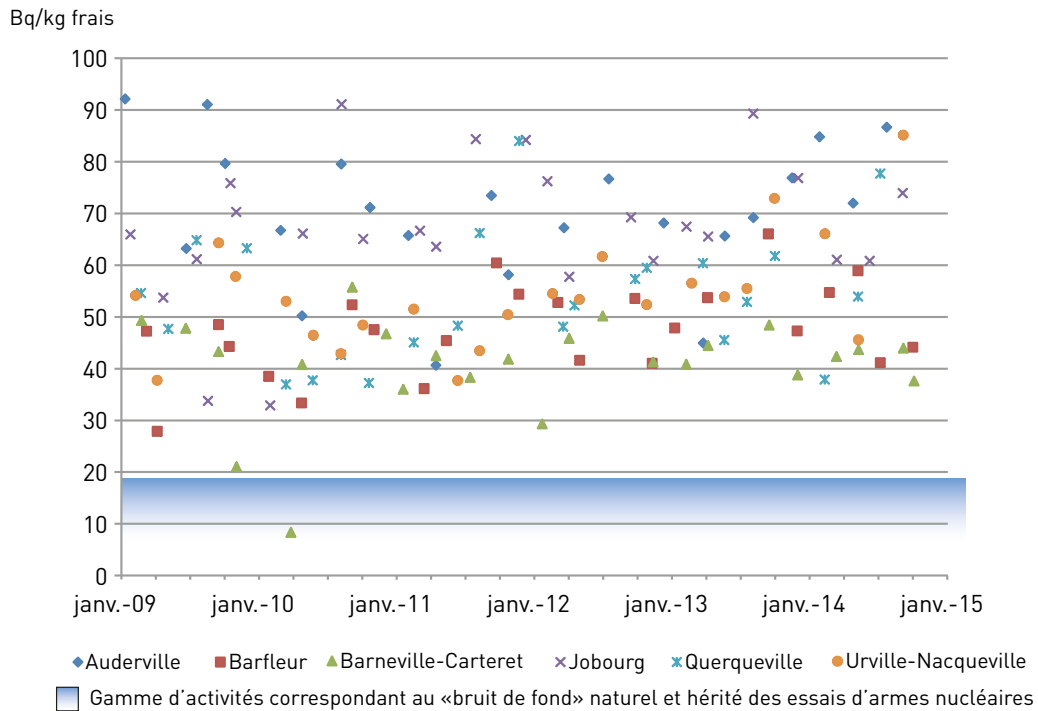
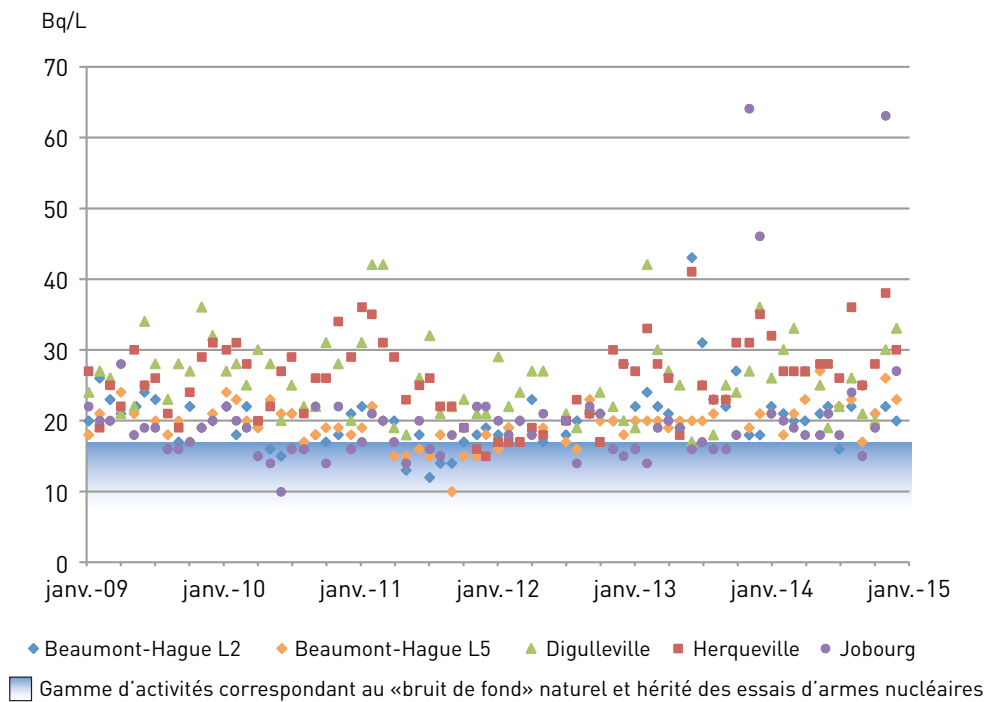


FIGURE 10 / ACTIVITÉS EN CARBONE 14 DU LAIT PRÉLEVÉ AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/L) DEPUIS JANVIER 2009



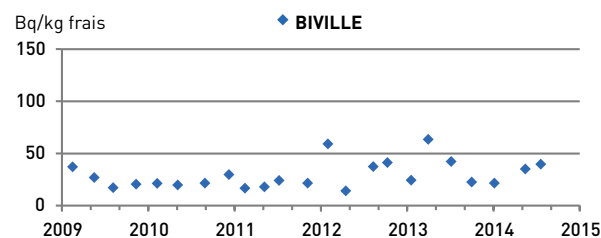
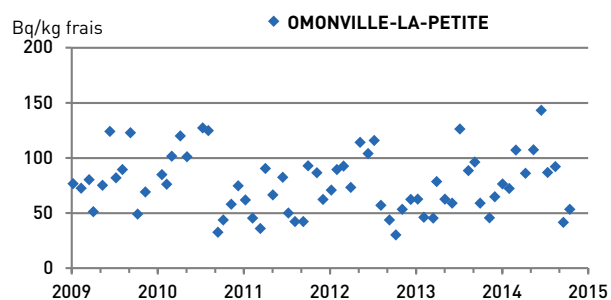
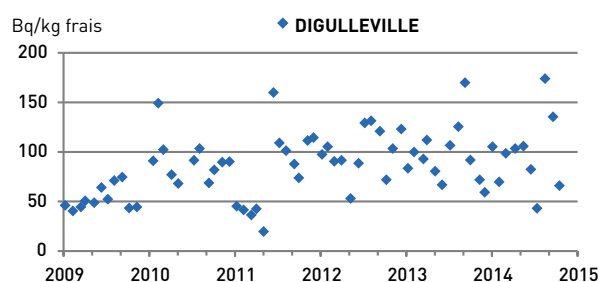
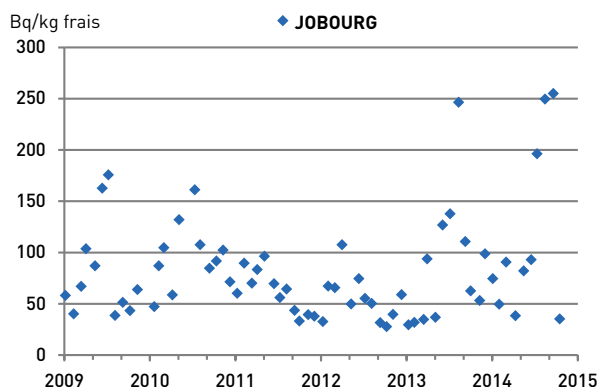
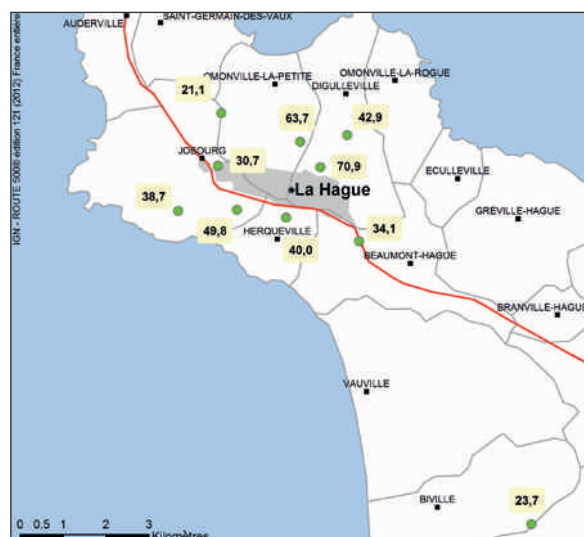
En milieu terrestre, les activités en carbone 14 autour de La Hague se distinguent également, mais dans une moindre mesure, du « bruit de fond » de ce radionucléide (cf. chapitre 2). Dans le lait, les activités mesurées dépassent rarement 40 Bq/L pour des moyennes comprises entre 19 et 25 Bq/L dont la majeure partie (de l'ordre de 16 Bq/L) est d'origine naturelle (cf. figure 10).

Ces activités dans le lait, cohérentes avec celles mesurées dans l'herbe, montrent que l'affouragement local constitue une partie de l'alimentation des vaches laitières. L'évolution spatiale des activités mesurées dans l'herbe est tout à fait cohérente avec la rose des vents et avec la distance entre le lieu de prélèvement et le site, ce qui permet de délimiter la zone d'influence des rejets atmosphériques de La Hague (cf. figure 11).

FIGURE 11 / ACTIVITÉS EN CARBONE 14 DES HERBAGES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

Valeurs moyennes sur la période 2011-2014 pour les dix stations de prélèvement et chroniques depuis 2009 sur quatre de ces stations. Les activités les plus élevées se trouvent à proximité du site et sous les vents dominants à l'est/nord-est du site.

Moyenne des activités en ¹⁴C, en Bq/kg frais, mesurées dans de l'herbe prélevée à proximité du site de La Hague

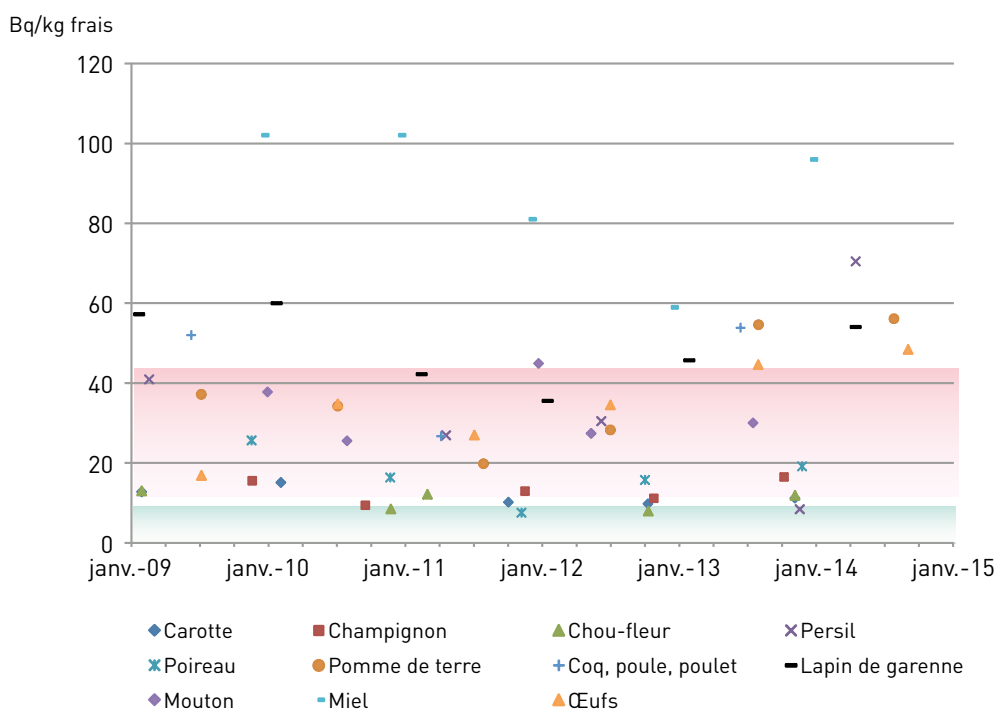


Les conséquences des rejets de ^{14}C sont moins importantes dans les légumes qui sont moins longtemps exposés au ^{14}C de l'air que l'herbe (cf. figure 12). Le miel présente les activités les plus élevées. En revanche, les teneurs en ^{14}C des viandes et des œufs restent dans la gamme ou proches de la gamme de celles observées en France et dont l'origine est essentiellement naturelle. La dose potentiellement due au carbone 14 rejeté par le site et liée à l'ingestion de denrées locales, est estimée à $0,7 \mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un adulte habitant le canton de Beaumont-Hague sur la base des activités moyennes mesurées dans

les denrées durant la période d'observation (avril 2011-décembre 2014). Cette valeur est à comparer à celle de $1,3 \mu\text{Sv}/\text{an}$ estimée par le GRNC sur la base de la même ration alimentaire.

Les activités de ^{14}C mesurées bimensuellement dans l'air à l'origine des activités mesurées dans la chaîne alimentaire terrestre, le plus souvent comprises entre $0,04$ et $0,2 \text{ Bq}/\text{m}^3$ (cf. figure 13) se distinguent également du bruit de fond (de l'ordre de $0,04 \text{ Bq}/\text{m}^3$). Toutefois, la dose liée à l'inhalation de ^{14}C , inférieure à $0,1 \mu\text{Sv}/\text{an}$, est faible au regard de celle potentiellement liée à l'ingestion de denrées locales.

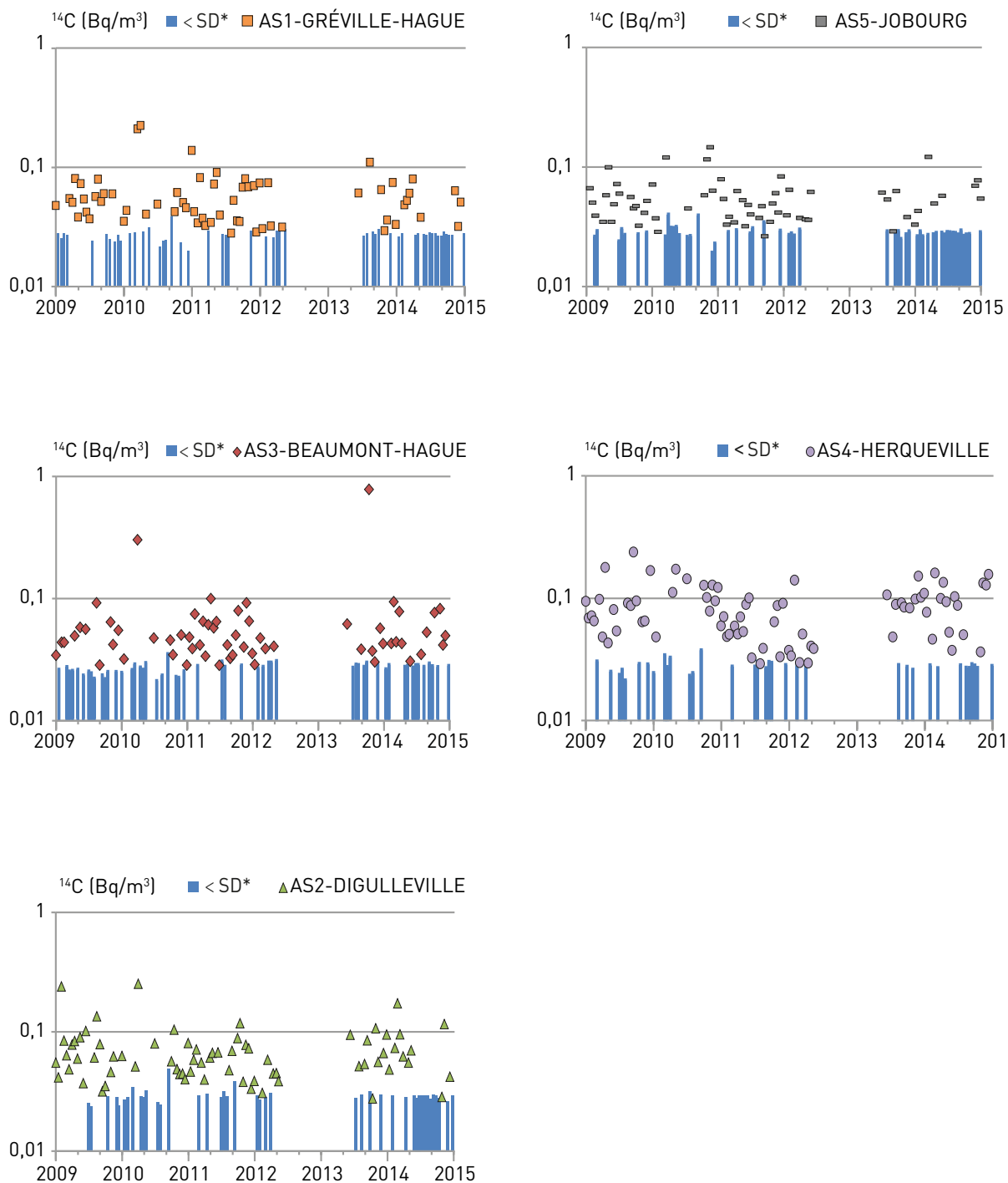
FIGURE 12 / ACTIVITÉS EN CARBONE 14 DE DIVERSES DENRÉES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais) DEPUIS JANVIER 2009



Gamme d'activités correspondant au «bruit de fond» naturel et hérité des essais d'armes nucléaires

Pour les légumes
 Pour les viandes

FIGURE 13 / ACTIVITÉS DE L'AIR EN CARBONE 14 MESURÉES DEPUIS JANVIER 2009 AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/m³)



* SD : seuil de décision

• **L'iode 129**

Bien qu'il ne puisse être mesuré que très ponctuellement dans l'air (valeurs maximales mesurées de l'ordre de 20 à 140 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, essentiellement sous forme gazeuse, concomitantes avec les bouffées de ^{85}Kr) et dans l'eau de mer (six valeurs mesurées entre 7 et 12 mBq/L au niveau d'Auderville et d'Herqueville), l'iode 129 rejeté par les installations de La Hague est mesuré dans plusieurs composantes des chaînes alimentaires terrestres et marines. Les activités moyennes mesurées dans l'herbe, de moins de 0,1 à 0,6 Bq/kg frais en moyenne sur la période

(cf. figure 14), expliquent tout à fait celles mesurées dans le lait de vache, de 0,019 à 0,027 Bq/L (cf. figure 15). La répartition spatiale des activités en iode 129 de l'herbe, similaire à celles du carbone 14, est cohérente avec la rose des vents et la distance du lieu de prélèvement par rapport au site. Dans les légumes (choux, carottes, pomme-de-terre, poireaux) exposés moins longtemps que l'herbe aux retombées atmosphériques, ainsi que dans le cidre, les activités en iode 129 étaient trop faibles pour être mesurées. En revanche, elles l'ont été dans le persil, le thym et les champignons (cf. figure 16).

FIGURE 14 / **ACTIVITÉS EN IODE 129 DES HERBAGES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)**

Valeurs moyennes sur la période 2011-2014 pour les dix stations de prélèvement et chroniques depuis 2009 sur quatre de ces stations. Les activités les plus élevées se trouvent à proximité du site et sous les vents dominants à l'est/nord-est du site.

Moyenne des activités en ^{129}I , en Bq/kg frais, mesurées dans de l'herbe prélevée à proximité du site de La Hague

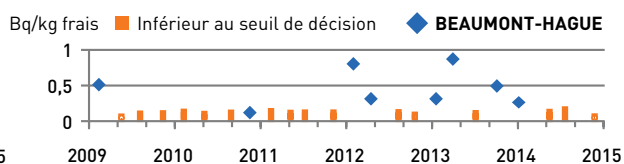
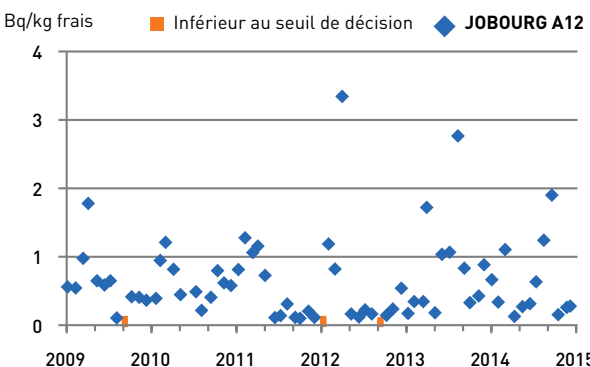
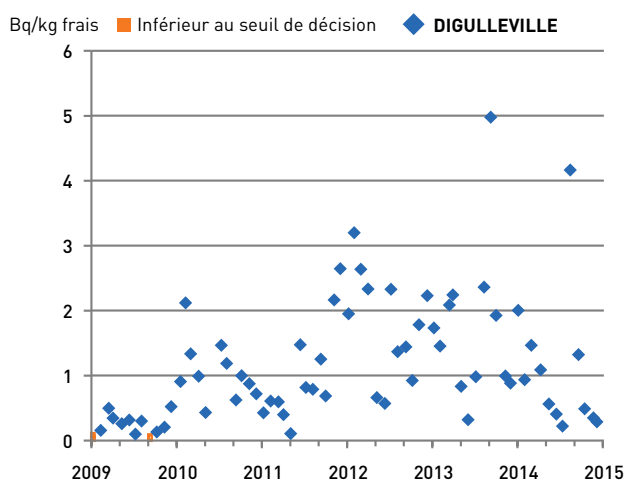
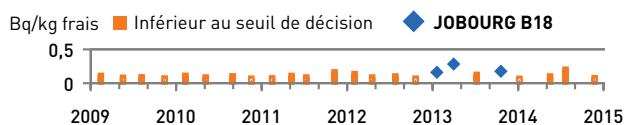
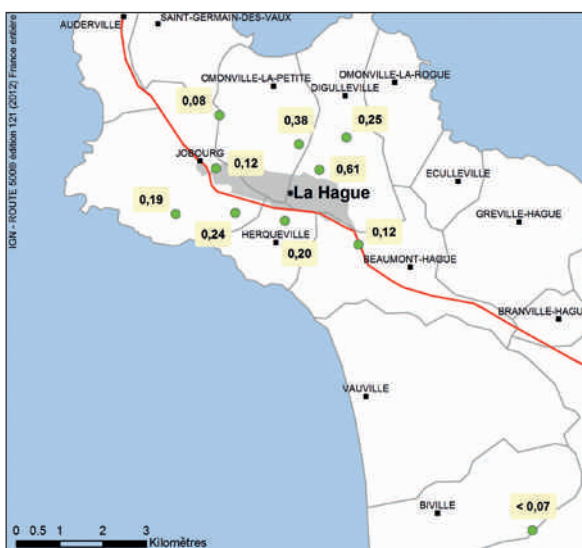


FIGURE 15 / ACTIVITÉS EN IODE 129 DU LAIT PRÉLEVÉ AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/L)

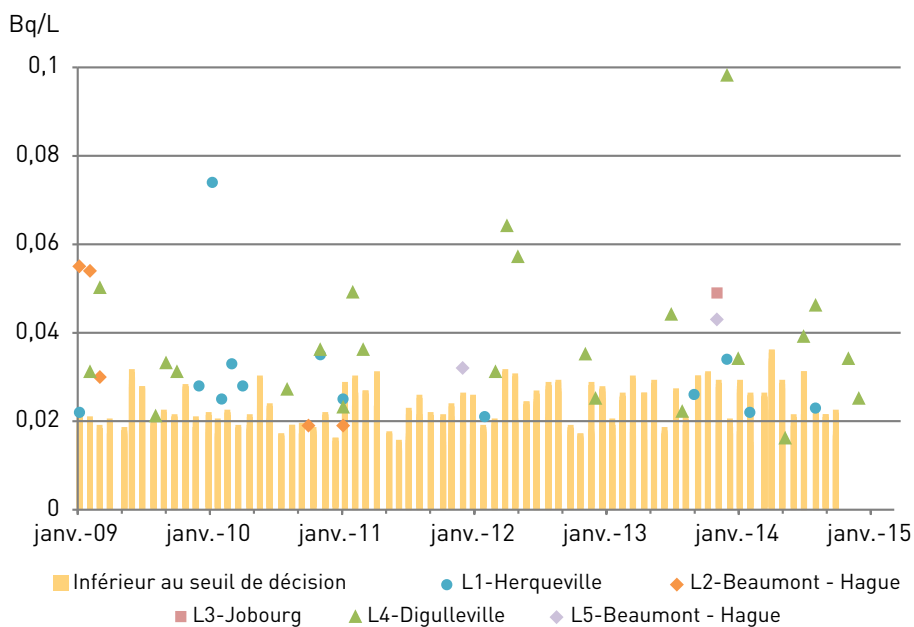
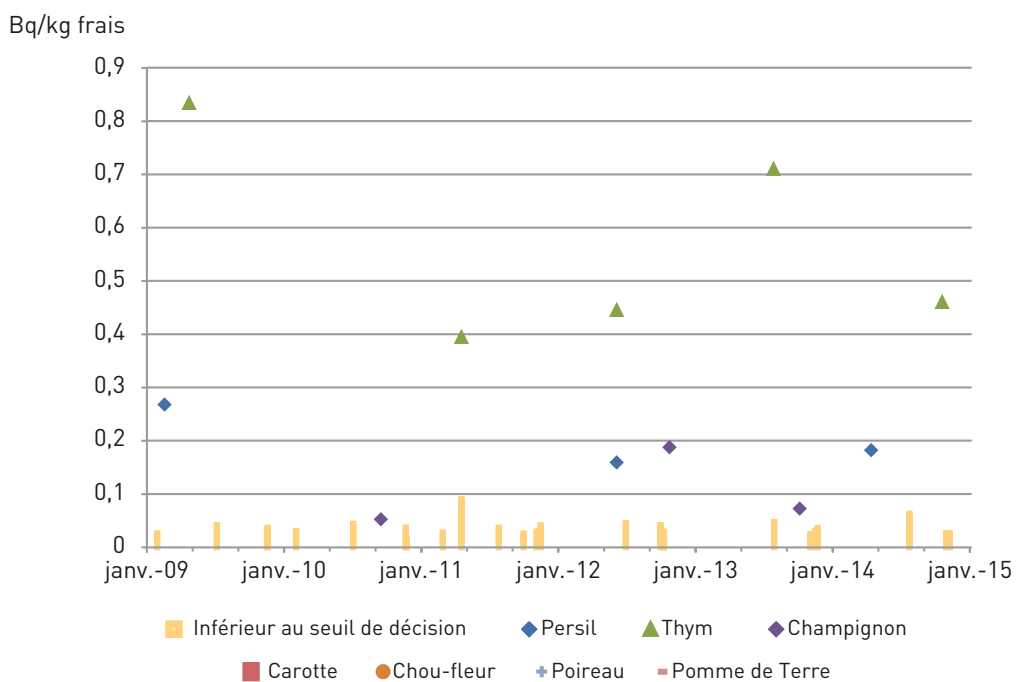


FIGURE 16 / ACTIVITÉS EN IODE 129 DE DIVERSES DENRÉES VÉGÉTALES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)



L'absence d'activités quantifiables dans la viande pourrait, comme dans le cas du carbone 14, résulter d'une faible part d'affouragement local. Toutefois, l'iode 129 a été mesuré dans les œufs (deux valeurs mesurées sur la période d'observation : 0,024 et 0,12 Bq/kg frais) ; une denrée vers laquelle l'iode est fortement transféré. L'iode 129 est également mesuré dans les plantes aquatiques prélevées dans les cours d'eau des Landes, des Combes et de la Sainte-Hélène, qui comme les algues, concentrent ce radionucléide (cf. figure 17).

Concernant les denrées marines (cf. figures 18, 19, 20 et 21), les activités moyennes mesurées les plus faibles sont celles des poissons (0,051 à 0,085 Bq/kg frais), celles des crustacés étant les plus élevées (0,11 à 0,31 Bq/kg frais). Cependant, en milieu marin les activités d'iode 129 les plus élevées sont mesurées dans les algues qui concentrent cet élément (cf. figure 22), constituant ainsi un bio-indicateur pertinent de l'influence des rejets d'iode 129 en zone plus éloignée. En effet, l'influence des rejets de La Hague est visible tout au long des côtes françaises de la Manche jusqu'à Dunkerque.

Ainsi une activité en iode 129 de 0,11 Bq/kg frais a été mesurée en 2012 dans des crustacés pêchés à Gravelines.

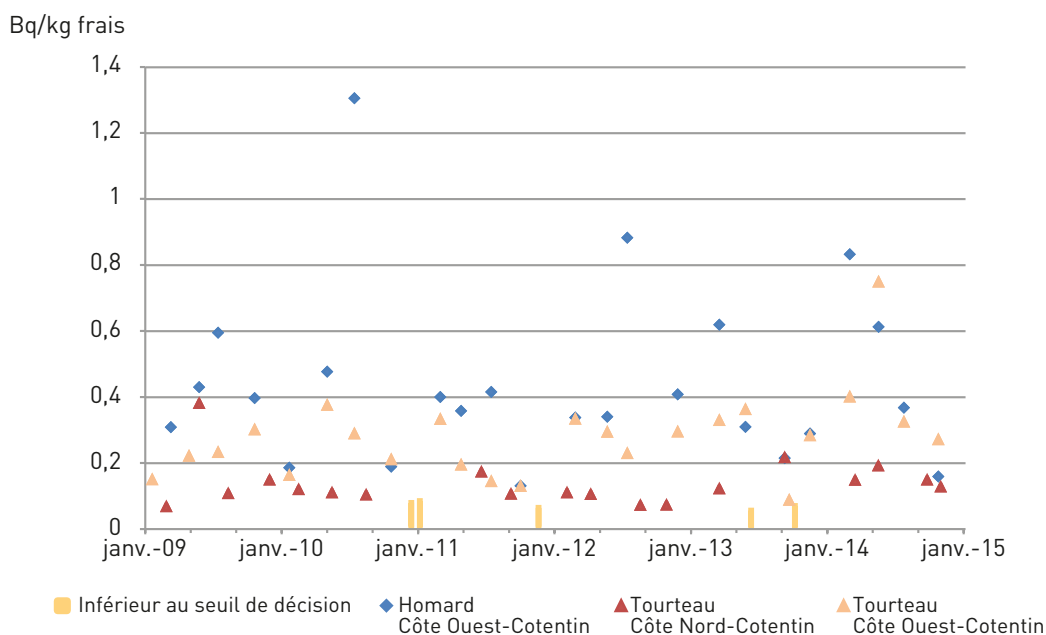
Sur la base des activités mesurées, la dose due à l'iode 129 résultant de l'ingestion de denrées locales au voisinage de La Hague est de 1,1 $\mu\text{Sv}/\text{an}^1$. Cette valeur est à comparer à celle estimée par le GRNC pour l'adulte « moyen » du canton de Beaumont-Hague : 0,7 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.



Prélèvement de patelles

© IRSN

FIGURE 17 / ACTIVITÉS EN IODE 129 DES CRUSTACÉS PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)



1. Cette dose a été évaluée en affectant la valeur mesurée dans le persil à tous les légumes dont les activités étaient trop faibles pour être mesurées ; en revanche, cette dose ne prend pas en compte la consommation de viande locale pour laquelle les activités étaient également trop faibles pour être mesurées.

FIGURE 18 / ACTIVITÉS EN IODE 129 DES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

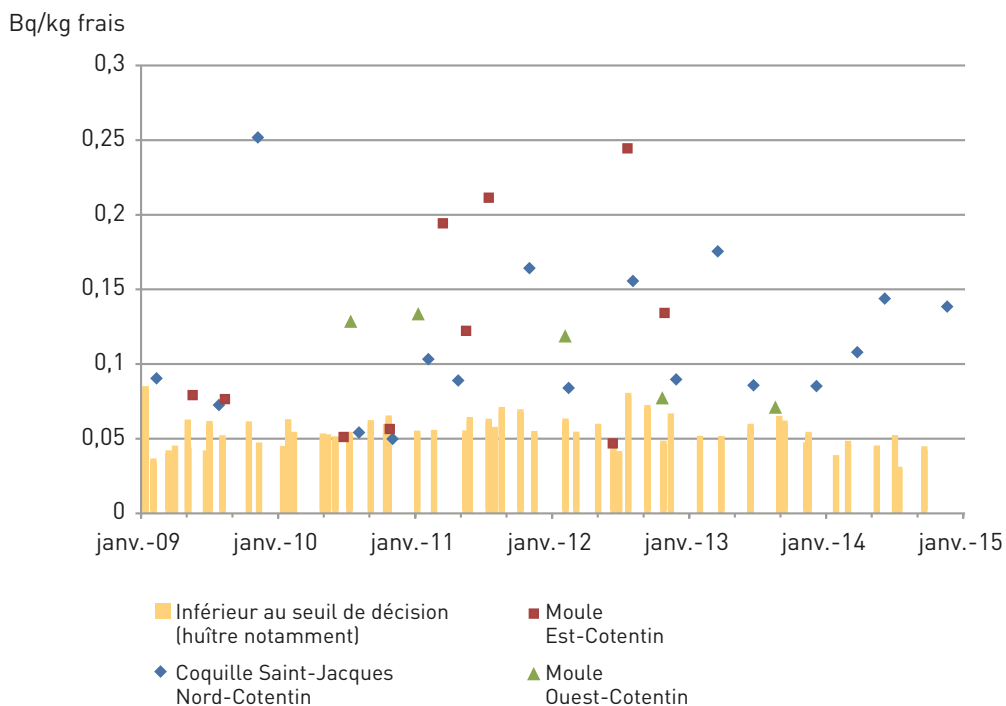


FIGURE 19 / ACTIVITÉS EN IODE 129 DES PATELLES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

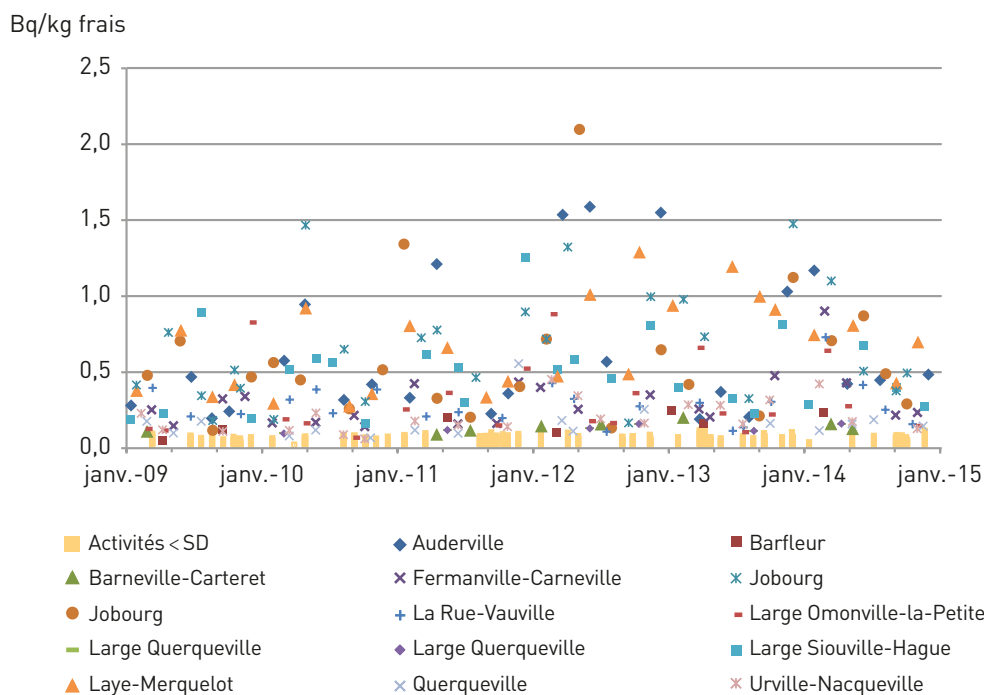


FIGURE 20 / ACTIVITÉS EN IODE 129 DES POISSONS PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

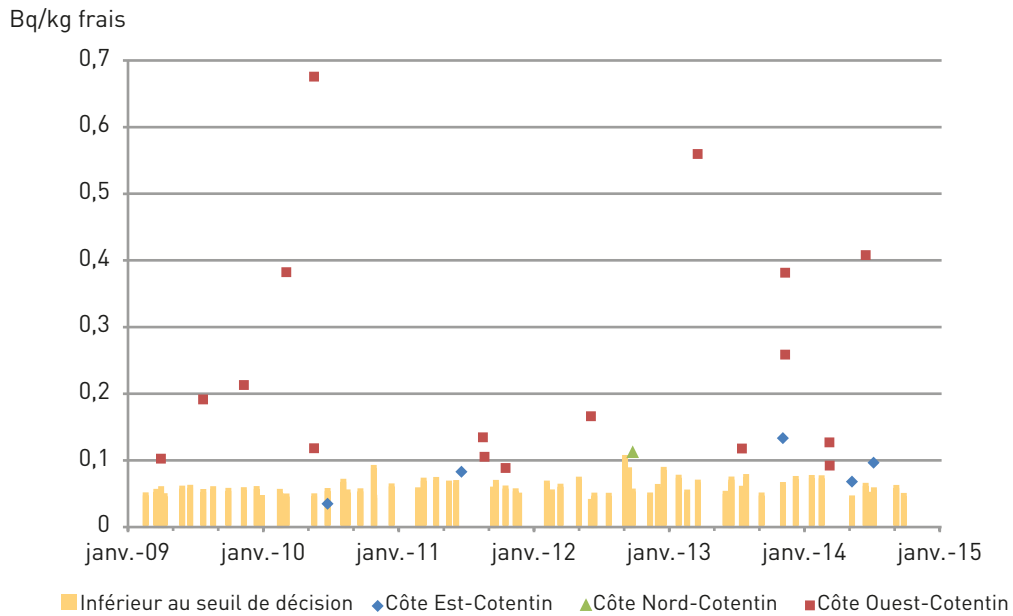


FIGURE 21 / ACTIVITÉS EN IODE 129 DES PLANTES AQUATIQUES PRÉLEVÉES DANS LES COURS D'EAU AU VOISINAGE DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

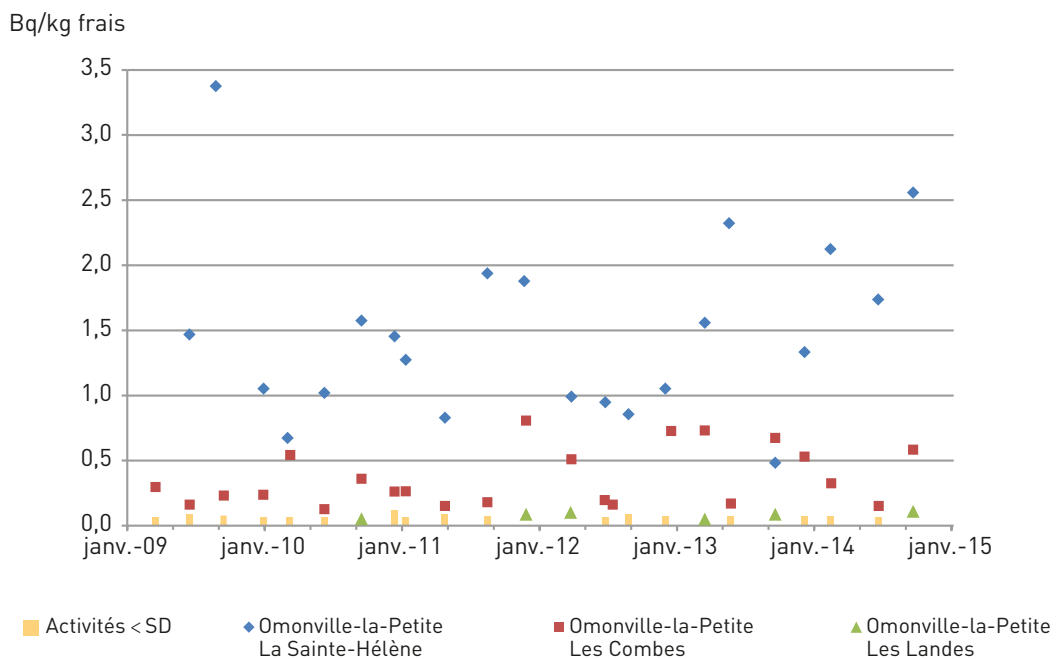
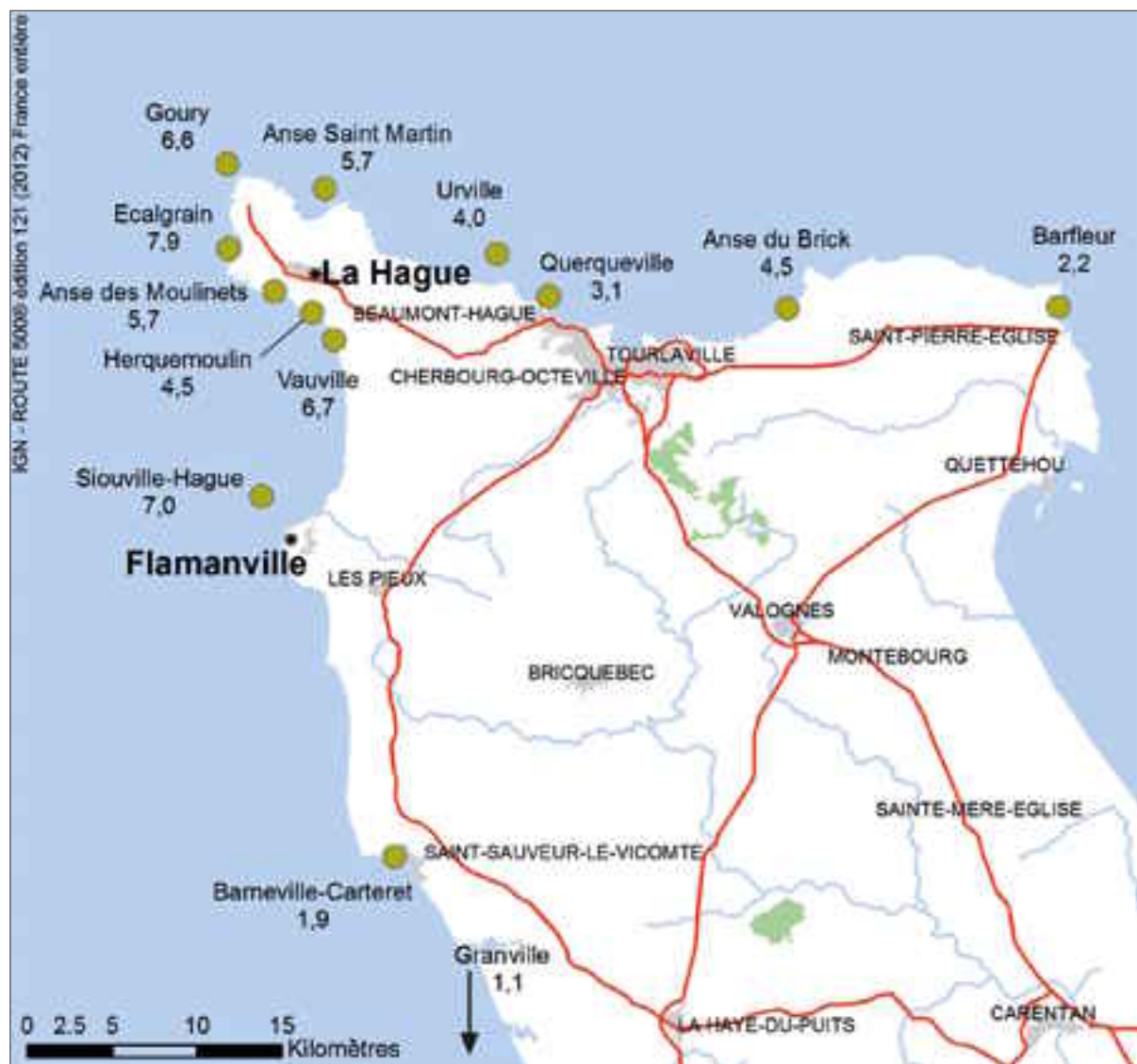


FIGURE 22 / ACTIVITÉS MOYENNES EN IODE 129 DES ALGUES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE
ENTRE JUIN 2011 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/kg frais)



• Le plutonium 238, 239+240 et l'américium 241

L'influence des rejets d'actinides (plutonium et américium) de La Hague n'est pas discernable des retombées anciennes en milieu terrestre. En milieu aquatique continental, notamment dans les ruisseaux de la Sainte-Hélène et du bassin des Moulinets, les rapports d'activité $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (de l'ordre de 0,65 en 2012) suggèrent un marquage par les rejets du site de La Hague. En revanche, cette influence est nette en milieu marin bien que les teneurs en plutonium des denrées marines aient diminué d'un facteur 5 à 10 en raison de la baisse des rejets. Les activités très faibles des isotopes 238 et 239+240 du plutonium n'ont pu être mesurées sur la période mai 2011-décembre 2014, que dans un échantillon de poissons (0,0012 et 0,0022 Bq/kg frais respectivement) et dans un échantillon d'araignées de mer (0,012 Bq/kg frais). L'américium 241 a pu être mesuré sur 2 échantillons d'araignées de mer et 2 échantillons de homards avec des activités allant de 0,012 à 0,050 Bq/kg frais.

En revanche, ces actinides sont régulièrement mesurés dans les denrées les plus sensibles que sont les mollusques : coquilles Saint-Jacques, huîtres, moules et patelles (cf. figures 23 et 24). Les activités en plutonium des coquilles Saint-Jacques et des patelles sont plus élevées que celles des moules et des huîtres. Les activités des patelles prélevées en différents points des côtes ne permettent pas de mettre en évidence une distinction géographique. Enfin, les activités en plutonium 238, bien que plus faibles,

sont du même ordre de grandeur que celles du plutonium 239+240, ce qui confirme la nette prédominance de l'origine industrielle locale de ce radionucléide².

Les activités en plutonium des denrées marines peuvent contribuer à la dose liée aux rejets de La Hague à hauteur de 0,6 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un individu moyen du canton de Beaumont-Hague tel que défini par le GRNC. Cette évaluation fait de l'incorporation d'actinides l'une des quatre principales voies d'exposition potentielle de la population avoisinante du site de La Hague. Il faut cependant noter qu'elle ne résulte que de l'ingestion de produits de la mer et n'est basée que sur un nombre extrêmement restreint de résultats de mesure en ce qui concerne les poissons et les crustacés.

Enfin, l'influence des rejets de La Hague est également visible dans les sédiments et les algues. Dans les algues, les moyennes des mesures réalisées sur la période mai 2011-décembre 2014 vont de 0,021 à 0,038 Bq/kg frais pour $^{239+240}\text{Pu}$ et de 0,013 à 0,027 Bq/kg frais pour ^{238}Pu . Dans les sédiments et sur cette même période, les moyennes des mesures vont de 0,28 à 1,0 Bq/kg sec pour $^{239+240}\text{Pu}$ et de 0,08 à 0,36 Bq/kg sec pour ^{238}Pu . Les échantillons présentant les valeurs les plus élevées proviennent de la rade de Cherbourg ; ceci s'explique par une plus grande finesse des sédiments qui permet une plus grande fixation des radionucléides. Comme pour les denrées marines des activités en ^{238}Pu du même ordre quoique inférieure à celles de $^{239+240}\text{Pu}$, témoignent de leur origine industrielle.



Prélèvement d'algues

2. Les retombées anciennes, celles des essais d'armes nucléaires et celles de la chute du satellite américain en 1964, sont caractérisées par des activités de plutonium 239+240 trente fois supérieures à celles du plutonium 238.

FIGURE 23 / ACTIVITÉS EN PLUTONIUM 238 ET 239+240 DES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

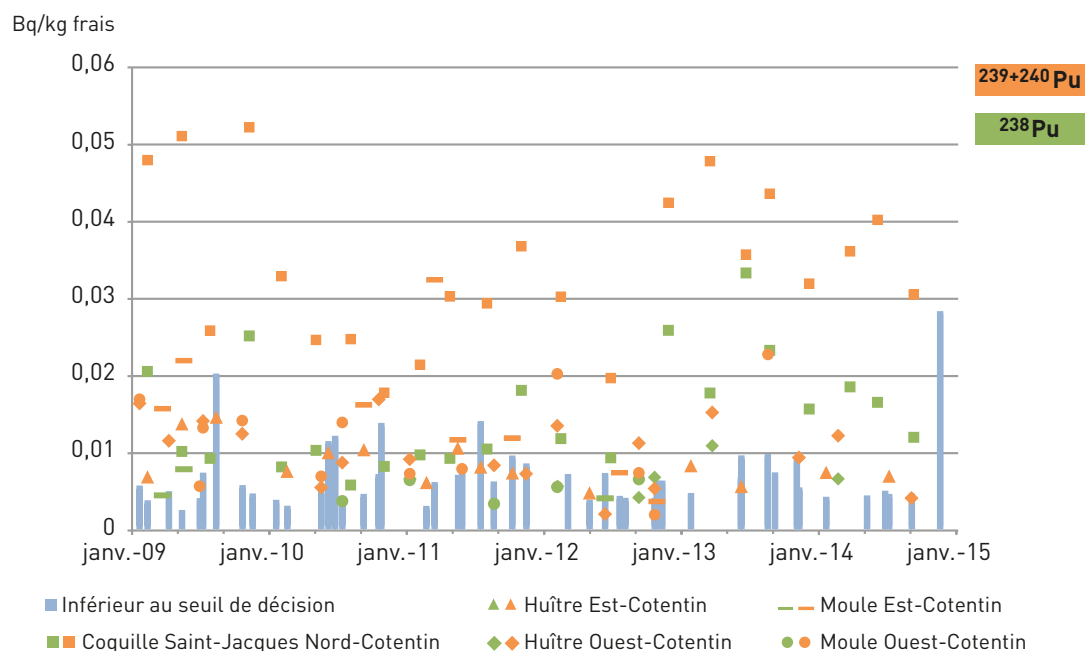
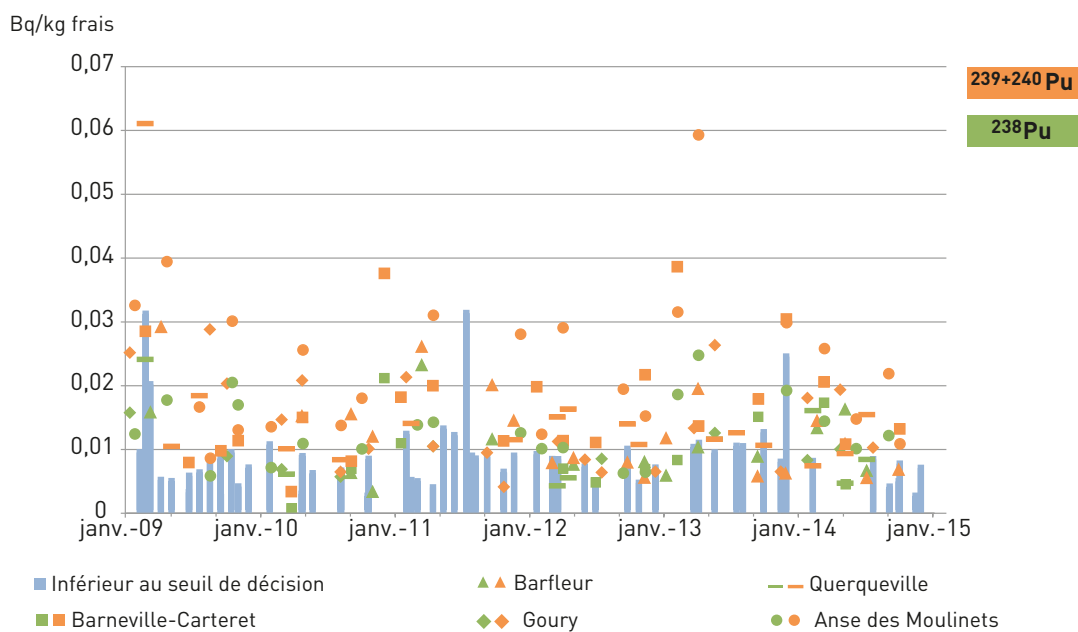


FIGURE 24 / ACTIVITÉS EN PLUTONIUM 238 ET 239+240 DES PATELLES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)



• **Le cobalt 60 et le ruthénium 106**

Jusqu'au milieu des années 2000, des activités de ruthénium 106, de cobalt 60, et même de césium 137, mesurées notamment dans des algues, des mollusques et des crustacés, témoignaient de l'influence des rejets liquides de La Hague non seulement sur son environnement marin proche (côtes du Nord-Cotentin) mais aussi sur l'ensemble des côtes françaises de la Manche³.

Depuis la baisse des rejets liquides de certains radionucléides (à partir de 2007), le ruthénium 106 n'est plus décelé dans le cadre de la surveillance effectuée par AREVA. Compte tenu de sa période radioactive relativement courte (1 an), même les activités sédimentaires constituées à l'époque où les rejets étaient plus importants ne sont plus mesurables. Du ruthénium 106 provenant des rejets d'AREVA a cependant pu être encore ponctuellement décelé dans des mollusques prélevés au voisinage du CNPE de Flamanville dans le cadre des études confiées à l'IRSN par EDF (cf. tableau 2). En revanche, il n'a plus été mesuré dans les denrées marines des côtes normandes depuis 2009 à Paluel et Gravelines et depuis 2007 à Penly.

En raison de la baisse régulière des rejets, le cobalt 60 n'est plus que très ponctuellement mesurable dans les denrées marines. Dans le cadre de la surveillance et sur la période 2011-2014, il n'a été mesuré que 2 fois dans des crustacés (tourteaux : 0,12 et 0,13 Bq/kg frais) et 2 fois dans les mollusques (coquilles Saint-Jacques : 0,38 et 0,39 Bq/kg frais). Les études réalisées par l'IRSN à la demande d'EDF, montrent que la fréquence de détection du cobalt 60 dans les denrées marines a été réduite sur les côtes de Normandie et les activités ont été divisées par 2 à 5 (cf. tableau 2). Enfin, le cobalt 60 est encore régulièrement mesuré dans les sédiments et les algues avec des activités moyennes sur les différents points de prélèvement allant de 0,2 Bq/kg sec à Barfleur à 0,7 Bq/kg sec à l'Anse St-Martin pour les sédiments, et de 0,08 à 0,19 Bq/kg frais dans les algues. Même si les activités rejetées par La Hague restent encore aujourd'hui beaucoup plus élevées que celles d'un site d'EDF, les rejets des centrales contribuent certainement aux activités de ⁶⁰Co mesurées, notamment au niveau de Gravelines.

TABEAU 2 / ACTIVITÉS DE COBALT 60 ET DE RUTHÉNIUM 106 (Bq/kg frais) MESURÉES DANS DES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS EN MANCHE ET ANALYSÉS DANS LE CADRE DES ÉTUDES CONFIAÉES À L'IRSN PAR EDF AUTOUR DES CNPE

Le rapport indique le nombre de fois pour lequel le radionucléide a pu être mesuré, sur le nombre de mesurage (les autres résultats sont inférieurs au seuil de décision).

		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Flamanville	⁶⁰ Co	0,019-0,04 3/9	0,027 1/6	0,04-0,14 5/6	0,03-0,7 7/8	0,06-0,11 5/7	0,02-0,05 2/8	0,03-0,06 5/8	0,03-0,07 5/8
	¹⁰⁶ Ru	-	-	0,27-0,6 2/6	0,6-0,8 3/8	0,3-0,4 3/7	0,25 1/8	0,18-0,27 2/8	0,12-0,16 3/8
Paluel	⁶⁰ Co	0,03 1/5	0,04-0,08 2/7	0,03 1/7	0,02-0,06 4/5	0,02-0,03 2/6	-	0,03 1/6	0,02 1/6
	¹⁰⁶ Ru	-	-	0,08 1/7	0,12 1/5	-	-	-	-
Penly	⁶⁰ Co	0,023 1/7	0,03-0,15 5/6	0,03 1/7	0,11 1/5	0,02 1/7	0,01-0,03 (2/7)	0,03 1/6	-
	¹⁰⁶ Ru	0,3 1/7	0,26-0,6 3/6	-	-	-	-	-	-
Gravelines	⁶⁰ Co	0,04-0,05 3/5	0,04-0,05 3/4	0,02-0,06 3/5	0,02-0,03 5/6	0,02-0,03 2/4	0,05 1/2	0,02 21/3	0,02 2/3
	¹⁰⁶ Ru	0,15 1/5	0,2-0,3 3/4	-	0,16 1/6	-	-	-	-

3. Les activités de ruthénium 106 sont imputables aux rejets de La Hague car les CNPE ne rejettent pas ce radionucléide ; les activités de cobalt 60 et de césium 137 sont majoritairement imputables aux rejets de La Hague plus de 1000 à 10 000 fois plus élevés que ceux des CNPE. Aujourd'hui cet écart est plus faible.

À la fin des années 90, le GNRC avait évalué à 0,3 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ la dose liée à ^{106}Ru et ^{60}Co par ingestion de denrées marines pour un adulte « moyen » du canton de Beaumont-Hague. En 2013, sur la base des activités mesurées au voisinage de Flamanville, les doses correspondantes sont estimées à 0,018 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cet écart s'explique en grande partie par la baisse des rejets (de l'ordre de 7 fois entre 1996 et 2013) ainsi que par la non-prise en compte de la consommation de poissons en raison de l'absence de résultats de mesures.

- **Le tritium**

L'influence des rejets gazeux tritiés de La Hague est très modérée en milieu atmosphérique et en milieu terrestre. Avec des activités inférieures à 0,6 Bq/m^3 , il n'est pas mesuré dans l'air mais il l'est régulièrement dans l'eau de pluie recueillie sur 3 stations d'AREVA, de l'ANDRA et de l'IRSN (cf. figure 25). Bien que les activités puissent dépasser ponctuellement 30 Bq/L à Digulleville et Omonville-La-Petite, la moyenne la plus élevée, celle d'Omonville-La-Petite, est de 9 Bq/L .

Les activités très modérées de tritium lié mesurées dans l'herbe résultent de ces activités atmosphériques. Suivant les stations de prélèvement, les moyennes des activités mesurées sur la période mai 2011 à décembre 2014 vont de 1,2 à 2,8 Bq/kg frais (à comparer à un bruit de fond de l'ordre de 1 à 2 Bq/kg). Comme pour le ^{14}C et l' ^{129}I , leur répartition spatiale est cohérente avec la rose des vents et la distance du lieu de prélèvement par rapport au site (cf. figure 26). Dans les légumes (carottes, oignons, persil, pomme de terre, poireaux, chou-fleur) ainsi que dans le thym et les mûres de ronce, les activités ne se distinguent pas du bruit de fond avec des moyennes d'activités allant de 0,8 à 1,2 Bq/kg frais. Si les activités en tritium libre du lait ne sont pas mesurables (<7 Bq/L), celles des viandes se distinguent du bruit de fond avec des moyennes sur la période étudiée de : 4,7 Bq/kg frais pour les volailles, 4,2 Bq/kg frais pour le mouton et 6,0 Bq/kg frais pour le lapin de garenne. Il est très probable que l'eau d'abreuvement, l'inhalation et le transfert cutané contribuent notablement à ces activités.



Prélèvement d'eau à proximité du site de La Hague

© DR

FIGURE 25 / ACTIVITÉS EN TRITIUM DE L'EAU DE PLUIE AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/L)

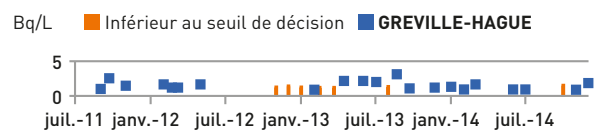
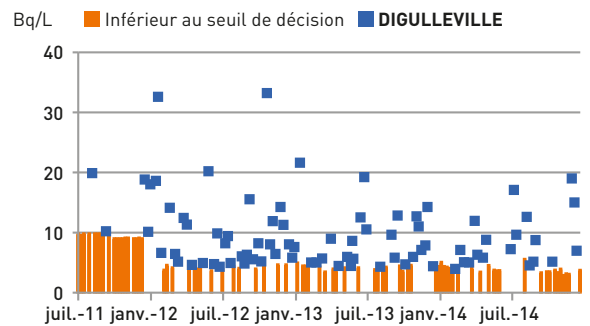
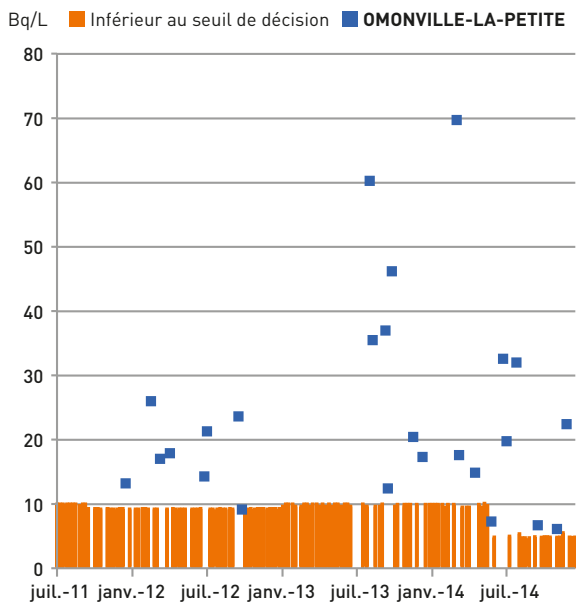
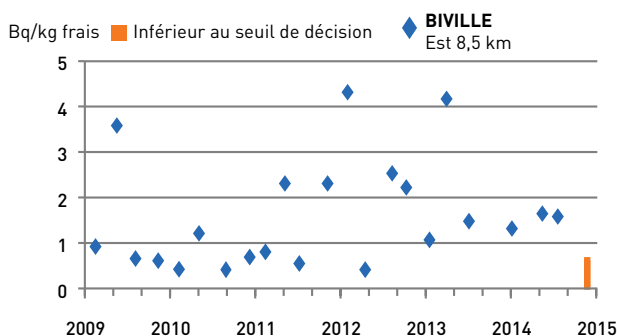
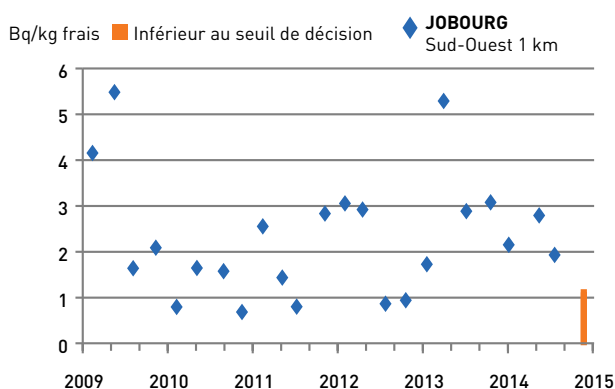
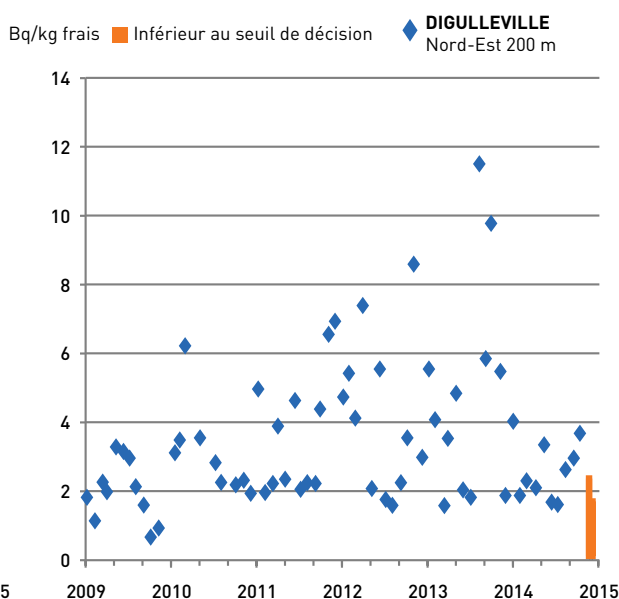
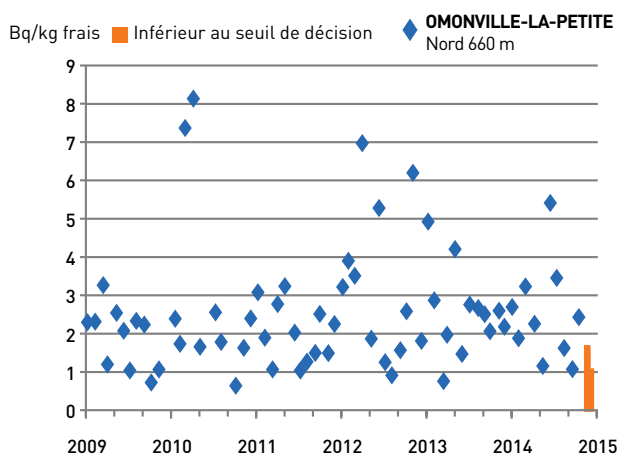
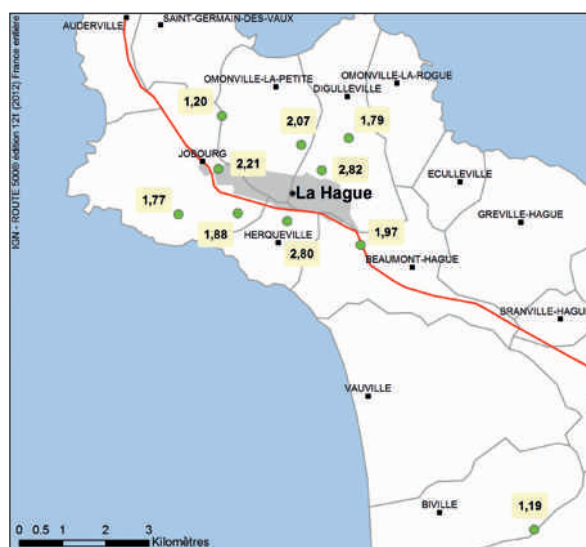


FIGURE 26 / ACTIVITÉS MOYENNES SUR LA PÉRIODE MAI 2011-DÉCEMBRE 2014 DU TRITIUM LIÉ DANS LES HERBAGES PRÉLEVÉS SUR LES 10 STATIONS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

Moyenne des activités en ^3H , en Bq/kg frais, mesurées dans l'herbe prélevée à proximité du site de La Hague.
 Chroniques des activités mesurées sur quatre de ces stations depuis janvier 2009. Les activités les plus élevées se trouvent à proximité du site et sous les vents dominants à l'est/nord-est du site.



Les activités moyennes du miel et des œufs sont plus faibles 3,4 et 1,6 Bq/kg frais respectivement. Ces activités sont proches (lapin, miel, œuf) de celles observées en 2010-2011 ou supérieures (cas du mouton) sans que cet écart soit significatif compte tenu du caractère très ponctuel du prélèvement.

Parmi les 14 cours d'eau surveillés, seuls 2 présentent régulièrement des activités en tritium dépassant 10 Bq/L : la Sainte-Hélène (activité moyenne sur la période d'étude de 27,5 Bq/L) et le grand Bel (activité moyenne sur la période d'étude de 454 Bq/L).

Les activités en tritium des eaux de boisson prélevées sur 12 stations environnantes sont inférieures à 7 Bq/L. Sur la dizaine de stations de contrôle des eaux de la nappe phréatique situées en aval hydraulique des sites de La Hague et plus particulièrement du CSM, plusieurs présentent des activités en tritium élevées pouvant dépasser ponctuellement 10 000 Bq/L, pour une moyenne de 666 Bq/L. La nappe phréatique en aval du CSM est affectée par une contamination en tritium historique, liée à un incident sur un ouvrage de stockage en 1976 et actuellement en phase de décroissance. L'activité tritium de la nappe en aval du site, plus marquée au pied des clôtures du CSM s'amenuise rapidement vers l'aval hydraulique de la nappe. L'eau de cette nappe n'est destinée à aucun usage.

L'influence des rejets liquides tritiés de La Hague mais aussi, bien que dans une moindre mesure, de l'usine britannique de Sellafield, est nette sur l'ensemble de la Manche.

L'activité moyenne de l'eau de mer se situe autour de 9 Bq/L au niveau du cap de La Hague (à comparer à un bruit de fond naturel de l'ordre de 0,01 à 0,02 Bq/L) et diminue progressivement lorsque l'on s'en éloigne ; elle est de l'ordre de 5 Bq/L au niveau du Tréport ou de Wilmereux. Il faut noter que ces valeurs moyennes masquent des variations très importantes en quelques heures (voir le focus du Bilan Radiologique IRSN de 2012). L'activité en tritium des organismes marins, végétaux et animaux étant en équilibre avec celle de l'eau, les activités massiques sont du même ordre.

En raison de la très faible radiotoxicité de ce radionucléide, les doses susceptibles de résulter des activités de tritium observées autour de La Hague sont extrêmement faibles, de l'ordre de quelques nSv/an, et sont négligeables au regard de celles 100 à 1 000 fois supérieures potentiellement dues au ^{85}Kr , ^{14}C , ^{129}I ou même aux actinides.



Prélèvement d'herbe à proximité du site de La Hague

© DR

Bilan

En juin 2014, des activités de ^{238}Pu et de $^{239+240}\text{Pu}$ de $0,57 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ et $0,59 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ respectivement, ont été mesurées sur les cumuls mensuels des filtres atmosphériques prélevés à Gréville et Digulleville respectivement. Cette anomalie a fait l'objet d'investigations et d'un rapport de la part d'AREVA. Ce rapport conclut que les activités mesurées ne résultent d'aucun incident particulier au niveau des émissaires de rejet. AREVA a par ailleurs évalué la dose potentiellement reçue par une personne qui aurait séjourné tout au long de ce mois en extérieur à proximité de la station de prélèvement à 20 nSv.

Hormis cette anomalie, les activités mesurées dans l'environnement de La Hague entre mai 2011 et décembre 2014 sont toutes conformes à celles attendues du fait des rejets autorisés. Elles s'inscrivent par ailleurs tout à fait dans la continuité des années antérieures. En accord avec leur prédominance dans les rejets, le krypton 85, le carbone 14, l'iode 129 et le tritium sont les radionucléides les plus régulièrement mesurés dans l'environnement.

La dose efficace pour un adulte moyen du canton de Beaumont-Hague (tel que défini par le GNRC), établie à partir de mesures réalisées (principalement) sur cette période, est évaluée à $3,7 \mu\text{Sv}/\text{an}$. Le krypton 85, le carbone 14 et l'iode 129 contribueraient à environ 84 % de cette dose dans des proportions équivalentes. Les activités en actinides (isotopes de plutonium et américium 241) mesurées dans quelques denrées marines pourraient, dans des hypothèses pénalisantes, contribuer à près de 16 % à cette dose. En raison de la baisse des rejets, la contribution du ruthénium 106 et du cobalt 60 à cette dose est maintenant très faible, inférieure à 1 %. Malgré une influence des rejets tritiés de La Hague bien visible dans l'environnement, notamment en milieu marin, la contribution de ce radionucléide à l'exposition de la population est négligeable (inférieure à 1 %) en raison de sa très faible radio-toxicité. Il faut par ailleurs noter que si l'on excepte l'exposition externe au krypton 85, inévitable si l'on réside à proximité de La Hague, la dose est liée à la consommation de denrées locales.

Cette dose de $3,7 \mu\text{Sv}/\text{an}$ est assez proche de celle évaluée par le GNRC en 1999 pour un adulte du Canton de Beaumont-Hague : $5 \mu\text{Sv}/\text{an}$. Une partie de l'écart peut s'expliquer par la baisse des rejets liquides de ruthénium 106 et de cobalt 60, ainsi que par l'absence de prise en compte de certaines voies d'exposition ou radionucléides pour lesquels aucune mesure n'est disponible. AREVA a estimé pour l'année 2012 à $4,5 \mu\text{Sv}/\text{an}$ la dose efficace potentiellement reçue par un pêcheur de Goury consommant beaucoup de fruit de mer locaux et à $8,3 \mu\text{Sv}/\text{an}$ celle reçue par un agriculteur de Digulleville consommant beaucoup de denrées agricoles locales. Ces estimations sont tout à fait cohérentes avec celles réalisées dans ce bilan radiologique et basées sur des moyennes de mesures. On peut par exemple noter que la dose externe due au krypton 85 à Digulleville est 3 fois supérieure à celle basée sur la moyenne des activités mesurées sur les 5 stations de prélèvement autour de La Hague : $3,5 \mu\text{Sv}/\text{an}$ au lieu de $1,15 \mu\text{Sv}/\text{an}$.

Ces doses se situent plus de 100 fois au-dessous de la dose limite considérée comme acceptable dans le cadre du fonctionnement normal des installations nucléaires. Elles peuvent par ailleurs être comparées aux doses liées à la radioactivité naturelle. Ainsi, la consommation d'un plat de moules ou de petits poissons, et donc de l'incorporation du polonium 210 (naturel) qu'ils contiennent, conduit à une dose du même ordre que la dose annuelle potentiellement imputable aux rejets radioactifs du site de La Hague.

Le centre de stockage de l'Aube et le centre de stockage de Morvilliers

Implanté sur les communes de Soulaines-Dhuys, Ville-aux-Bois et Epothémont dans le département de l'Aube, le Centre de Stockage de l'Aube exploité par l'ANDRA (INB n°149) depuis janvier 1992, est le second centre français de stockage en surface pour les déchets radioactifs de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC). Il a pris le relais du Centre de stockage de la Manche. Ce Centre est autorisé à accueillir 1 million de m³ de colis de déchets radioactifs. À fin 2013, 28 % de cette capacité totale de stockage autorisée étaient atteints.

Les déchets FMA-VC sont essentiellement liés à la maintenance (vêtements, outils, filtres...) et au fonctionnement des installations nucléaires, des centres de recherche et des centres médicaux. Les déchets FMA-VC sous forme solide peuvent être compactés sur place dans les installations de l'Andra (Atelier de compactage des déchets - ACD), pour en réduire le volume. Les déchets compactés sont placés dans un conteneur en métal et mélangés à un matériau d'enrobage (mortier). Les déchets sont stockés en surface dans des ouvrages en béton armé. Une fois remplis, les ouvrages sont fermés par une dalle en béton dont l'étanchéité est assurée par un revêtement imperméable.

FIGURE 1 / LOCALISATION DES CENTRES DE STOCKAGE DE L'AUBE ET DU CIRES

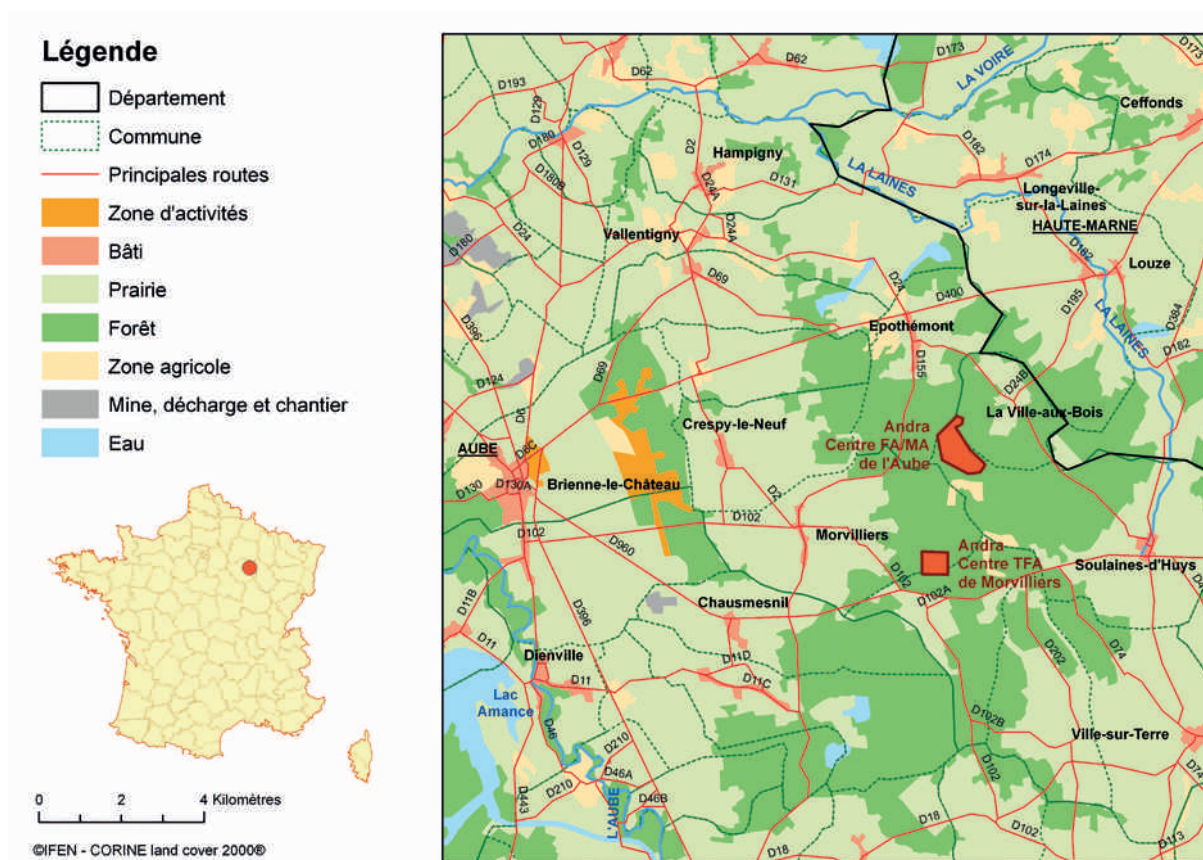


FIGURE 2 / LE CENTRE DE STOCKAGE DE L'AUBE (CSA)



Centre de stockage de Soulaines

Implanté à quelques kilomètres du CSA sur les communes de Morvilliers et de La Chaise, le Cires est une Installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) qui accueille trois activités : depuis 2003, le stockage des déchets de très faible activité (TFA) et, depuis l'automne 2012, le regroupement et l'entreposage de déchets non issus de la filière électronucléaire. Ainsi, les déchets du Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) de Morvilliers proviennent pour l'essentiel du démantèlement ou de l'exploitation

d'installations nucléaires, mais aussi d'hôpitaux, de centres de recherche, de laboratoires pharmaceutiques ou d'autres filières industrielles, voire de particuliers.

Les déchets classés « Très faible activité (TFA) » sont conditionnés dans des emballages puis empilés dans les alvéoles de stockage creusées dans une couche d'argile. Lorsque la hauteur maximale de stockage est atteinte, l'alvéole est recouverte d'un remblai argileux compacté pour lui redonner son imperméabilité d'origine.

Les rejets radioactifs

• Rejets radioactifs du CSA

Les rejets d'effluents gazeux effectués par la cheminée de l'atelier de compactage des déchets sont autorisés, selon des conditions et des limites définies dans l'arrêté de rejet du CSA. Ces rejets atmosphériques font l'objet de contrôles *via* des dispositifs de prélèvements en continu (filtre, cartouche, barboteurs) et d'analyses différées en laboratoire.

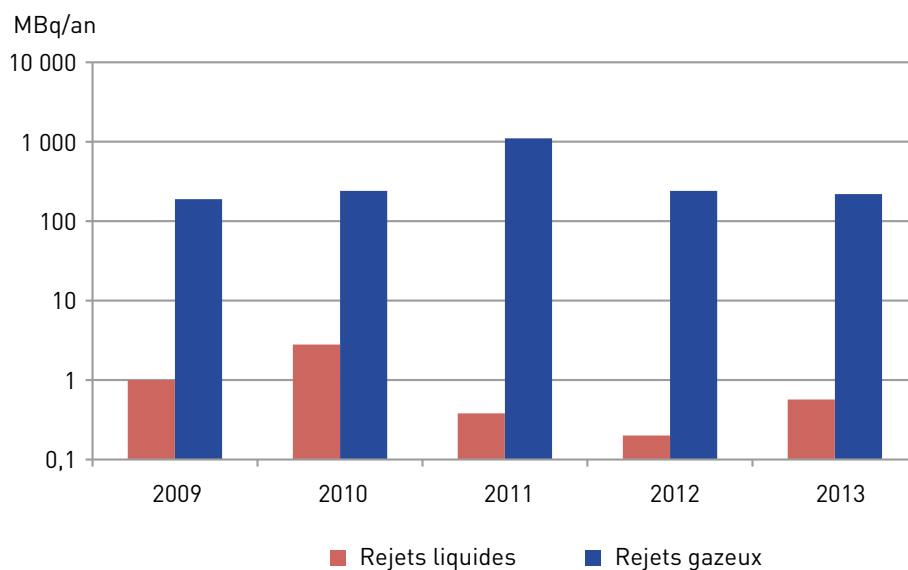
Les déchets liquides radioactifs du CSA sont constitués essentiellement des effluents produits au niveau de l'enceinte de compactage des déchets et du laboratoire. Ils sont collectés dans des réservoirs étanches puis évacués hors de l'installation pour être traités sur un autre site.

Les effluents liquides susceptibles d'être contaminés sont collectés dans plusieurs réservoirs sur le site et rejetés, après contrôle (tritium, carbone 14, émetteurs alpha et bêta-gamma), dans un réseau spécifique aboutissant au bassin d'orage, seul exutoire situé en rive droite des Noues d'Amance.

• Rejets radioactifs du Cires

Les effluents liquides du Cires susceptibles d'être contaminés radiologiquement sont considérés comme des déchets liquides : ils sont collectés, entreposés dans des cuves puis recyclés ou éliminés par une filière de traitement extérieure autorisée. Les autres effluents liquides (eaux pluviales, effluents domestiques...) sont collectés, traités pour certains d'entre eux (décantation, déshuilage) puis dirigés dans le ru de Loriguette au nord du site et dans le ru Courgain au sud du site *via* des bassins. Les rejets gazeux du Cires sont liés au traitement des déchets. Un dispositif de prélèvement d'air en continu placé au point de rejet du système de ventilation/filtration permet de contrôler l'air rejeté (mesure du tritium atmosphérique, des iodes [¹²⁵I, ¹²⁹I et ¹³¹I]), du carbone 14 et des activités alpha et bêta globales). En 2013, les rejets en tritium et carbone 14 étaient respectivement de 32 MBq et 12,1 MBq. Ces valeurs d'activité sont fortement majorées par la comptabilisation des seuils de décision, les activités volumiques mesurées étant majoritairement inférieures à ces seuils.

FIGURE 3 / ÉVOLUTION DES REJETS LIQUIDES ET GAZEUX EN TRITIUM DU CSA ENTRE 2009 ET 2013 (MBq/an)



La surveillance radiologique de l'environnement du site

• Surveillance du CSA

La surveillance de l'environnement du CSA conduit annuellement à la réalisation d'environ 2000 prélèvements sur lesquels sont effectuées plus de 12000 mesures radiologiques. Pour le compartiment atmosphérique, la surveillance de la radioactivité de l'environnement réalisée par l'exploitant est assurée par des mesures intégrées du rayonnement gamma ambiant et des mesures différées sur des prélèvements d'air (mesure du tritium atmosphérique), de poussières atmosphériques (mesure des activités alpha et bêta globales), de gaz halogènes (mesure des iodes 125, 129 et 131) et d'eau de pluie (mesure du tritium et des activités alpha et bêta globales) via deux stations de surveillance placées sous les vents dominants. Dans le milieu terrestre, deux prélèvements mensuels de végétaux sont réalisés et deux prélèvements trimestriels de lait. Une campagne annuelle de prélèvements sur les champignons, les principales productions agricoles et sur la couche superficielle des terres est également réalisée, notamment dans les zones sous les vents dominants. Les prélèvements terrestres font généralement l'objet d'une mesure des activités alpha et bêta globales et d'une spectrométrie gamma. Ces analyses sont complétées annuellement par la mesure du tritium, du carbone 14 et une spectrométrie alpha permettant notamment la mesure des transuraniens.

Dans le compartiment aquatique, des prélèvements ponctuels (hebdomadaires, mensuels ou trimestriels) d'eau de surface et de sédiments sont effectués dans les Noues d'Amance en amont et en aval du point de rejet, ainsi que dans la Voire en aval du point de rejet du CSA.

Les prélèvements d'eau et de sédiments font l'objet de mesures des activités alpha et bêta globales et de tritium (sur les eaux), complétées régulièrement (en aval du point de rejet) par des mesures par spectrométrie alpha et gamma. Des prélèvements semestriels de végétaux aquatiques et annuels de poissons sont réalisés dans les Noues d'Amance. Les mesures réalisées sur la faune et la flore aquatiques sont comparables à celles effectuées sur les eaux et les sédiments.

Un contrôle des eaux souterraines sous-jacentes au CSA est réalisé mensuellement par des prélèvements effectués à partir de 8 piézomètres implantés à l'intérieur du CSA et trimestriellement en 14 autres points. Sur ces prélèvements, les activités alpha et bêta globales et tritium sont mesurées.

• Surveillance du Cires

La surveillance du Cires est définie par l'arrêté préfectoral régissant les activités du site. Plus de 1500 analyses radiologiques sont effectuées annuellement par un laboratoire agréé.

Un dispositif de prélèvement d'air en continu implanté sur le bâtiment administratif permet de contrôler l'impact des rejets canalisés issus du bâtiment de traitement et des rejets diffus du centre (alvéoles de stockage...). Les mesures réalisées sur cette station sont les mêmes que celles réalisées au point de rejet du bâtiment de traitement. Le Cires dispose également de dispositifs de mesure du rayonnement gamma ambiant passifs (dosimètres).

Des prélèvements d'eau et de sédiments sont réalisés sur les rus (ru Courgain et ru de Loriguette). Les eaux font l'objet de mesures des activités alpha et bêta globales et de tritium. Des mesures par spectrométrie alpha et gamma sont réalisées sur les sédiments. Le suivi piézométrique des eaux souterraines de la nappe du Barrémien, située sous la barrière géologique, permet de contrôler la distance entre le niveau de l'aquifère et le fond des alvéoles de stockage. Un suivi radiologique semestriel est réalisé sur les nappes du Barrémien et de l'Ap-tien. Les mesures réalisées sur ces eaux sont semblables à celles effectuées sur les eaux de surface et permettent de vérifier l'absence d'impact radiologique significatif du site.

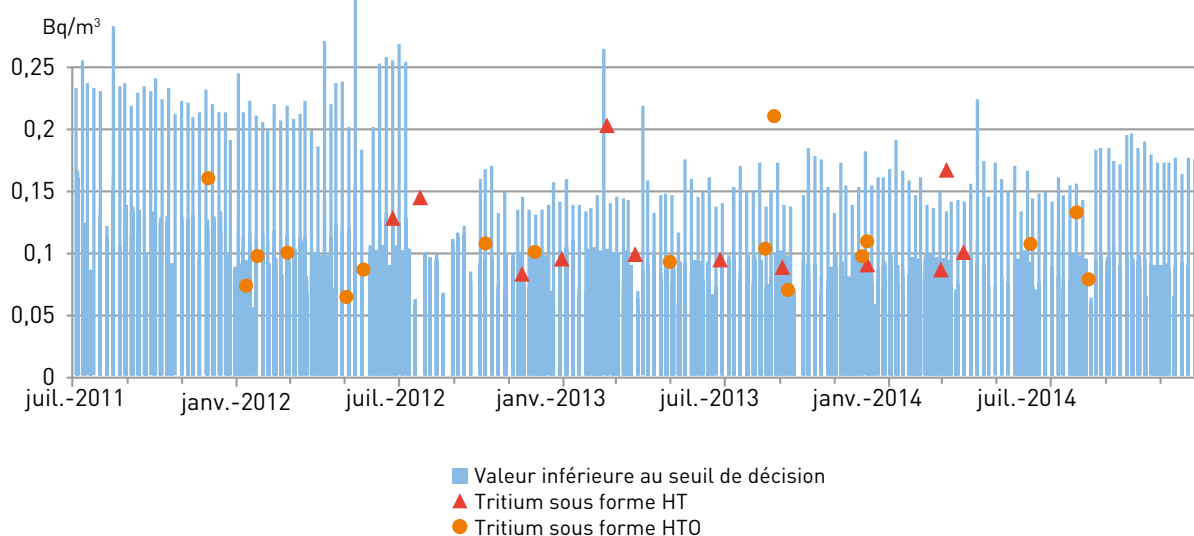
Influence des sites CSA et Cires de l'Andra sur l'environnement

La surveillance du tritium atmosphérique (par barboteur) ne met en évidence que très ponctuellement des activités supérieures au seuil de décision (3% des analyses). Les cas observés sur la période 2011-2014 proviennent du barboteur installé au Cires. Les activités maximales mesurées sont de 0,47 Bq/m³ en 2012, 0,3 Bq/m³ en 2013 pour le tritium total et 0,17 Bq/m³ en 2014

pour le tritium sous forme HT. Ces résultats (cf. figure 4), sont à comparer au bruit de fond du tritium atmosphérique hors influence des installations nucléaires qui est d'environ 0,01 Bq/m³ pour la vapeur d'eau tritiée.

La surveillance des iodes 125, 129 et 131 sous forme gazeuse par prélèvement d'air sur cartouche n'a pas mis en évidence ces radionucléides dans l'environnement entre 2011 et 2014. La surveillance des aérosols atmosphériques ne montre aucun impact des activités du site.

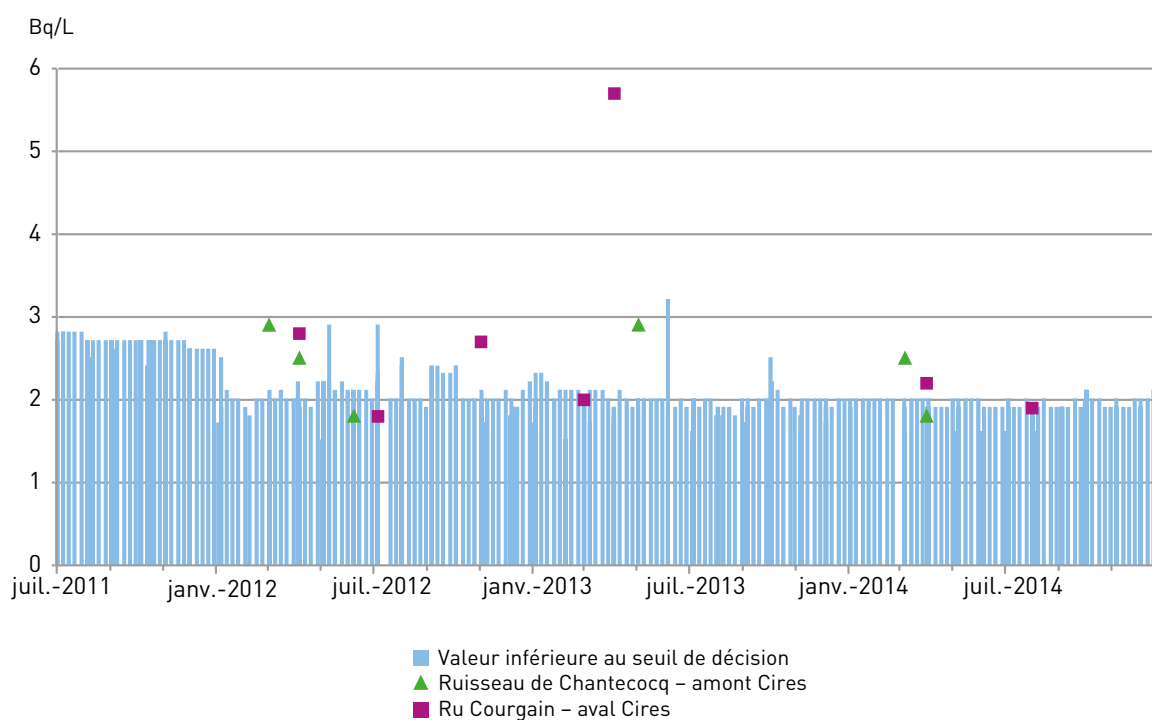
FIGURE 4 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'AIR À PROXIMITÉ DES CENTRES CSA ET CIRES ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/m³)



Le tritium est également rarement détecté dans les eaux de pluie collectées à proximité des sites de l'Andra (seuls 1,3 % des analyses) avec des activités très proches du bruit de fond (1 à 3 Bq/L). L'activité maximale détectée entre juillet 2011 et décembre 2014 est de 4,8 Bq/L (données IRSN et Andra) sur l'un des collecteurs de pluie du CSA. L'Andra réalise de nombreuses mesures sur les eaux des ruisseaux situés en amont du Cires (ruisseau de Chantecocq...), entre le Cires et le

CSA (ru Courgain, ru de Loriguette) et en aval du CSA (Noues d'Amance notamment). L'analyse des données montre que les sites de l'Andra n'influent pas sur l'activité des radionucléides mesurés dans ces échantillons. Les activités en tritium mesurées dans les eaux de surface très majoritairement inférieures à 2 Bq/L avec quelques valeurs entre 2 et 3 Bq/L en amont et en aval du Cires (cf. figure 5), ne sortent pas du bruit de fond du tritium en France.

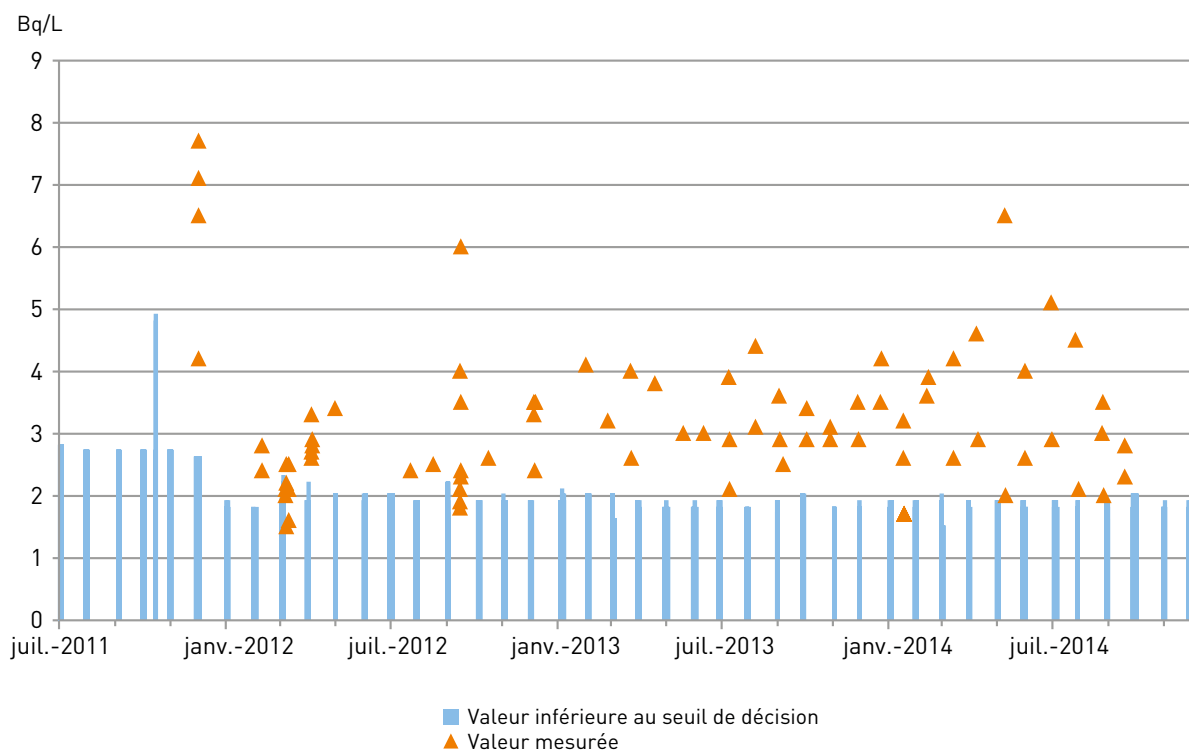
FIGURE 5 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS LES EAUX DE SURFACE PRÉLEVÉES PRÈS DES CENTRES CSA ET CIRES DE L'ANDRA ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/L)



La surveillance radiologique des eaux souterraines de ces deux centres est réalisée à partir de plus de 35 piézomètres installés à l'intérieur et à l'extérieur des sites. Les activités en tritium des eaux prélevées en certains points sont assez régulièrement supérieures au bruit de fond avec un maximum de 7,7 Bq/L (cf. figure 6). Les activités maximales sont

mesurées dans les eaux souterraines prélevées sur le CSA à proximité des ouvrages de stockage. Les investigations menées par l'Andra ont permis d'identifier l'origine de ce tritium qui migre depuis deux ouvrages de stockage dans lesquels des colis contenant des plaques à repères radio-luminescents au tritium ont été stockés en 1994.

FIGURE 6 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS LES EAUX SOUTERRAINES PRÉLEVÉES DANS LES PIÉZOMÈTRES DES CENTRES CSA ET CIRES DE L'ANDRA ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 TOUS PIÉZOMÈTRES CONFONDUS (Bq/L)



Aucune autre anomalie liée aux activités industrielles de ces sites n'a été détectée dans les autres mesures réalisées dans les eaux souterraines, les sédiments, les poissons et les végétaux aquatiques (renoncules).

Les résultats associés aux prélèvements d'herbe et de sol effectués à proximité des sites de l'Andra sont globalement inférieurs aux seuils de mesure (^{137}Cs , ^3H). Sur la période d'analyse de ce bilan

(2011-2014), quelques prélèvements d'herbe ont donné des résultats en tritium libre et lié compris entre 0,2 et 3,4 Bq/kg frais, caractéristiques du bruit de fond français du tritium dans les végétaux.

Les autres mesures réalisées dans l'environnement de ces deux sites relèvent toutes soit de la radioactivité naturelle (^{40}K , ^7Be ...), soit de la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl ou de celles des essais d'armes nucléaires (^{137}Cs ...).



Centre de stockage TFA de Morvilliers.

3.4. LES SITES DE RECHERCHE

Le site de Marcoule

- **Le site, ses rejets et sa surveillance**

Le centre de Marcoule, implanté dans le Gard, en rive droite du Rhône (cf. figure 1), comprend une vingtaine d'installations, notamment le réacteur PHENIX arrêté définitivement fin 2009, l'installation ATALANTE mettant en œuvre du combustible irradié pour la recherche, l'usine MELOX d'AREVA destinée à la fabrication des assemblages combustibles MOX, l'usine CENTRACO de SOCODEI qui conditionne les déchets de très faible activité et des installations nucléaires de

base secrètes liées à la Défense nationale (INBS). Les principales installations de cette INBS sont arrêtées ou en cours de démantèlement : les réacteurs Célestin 1 et 2 ont été mis à l'arrêt définitif fin 2009 et l'Atelier tritium de Marcoule (ATM) a été définitivement arrêté en juin 2012.

Les rejets du centre sont résumés au tableau 1. Le plan de surveillance des exploitants et celui de l'IRSN sont indiqués au tableau 2. Compte tenu de la prépondérance du tritium dans les rejets d'effluents atmosphériques, bien qu'en diminution (cf. figure 2), la surveillance des différentes composantes de l'environnement de Marcoule porte systématiquement sur ce radionucléide.

FIGURE 1 / IMPLANTATION GÉOGRAPHIQUE DU CEA DE MARCOULE

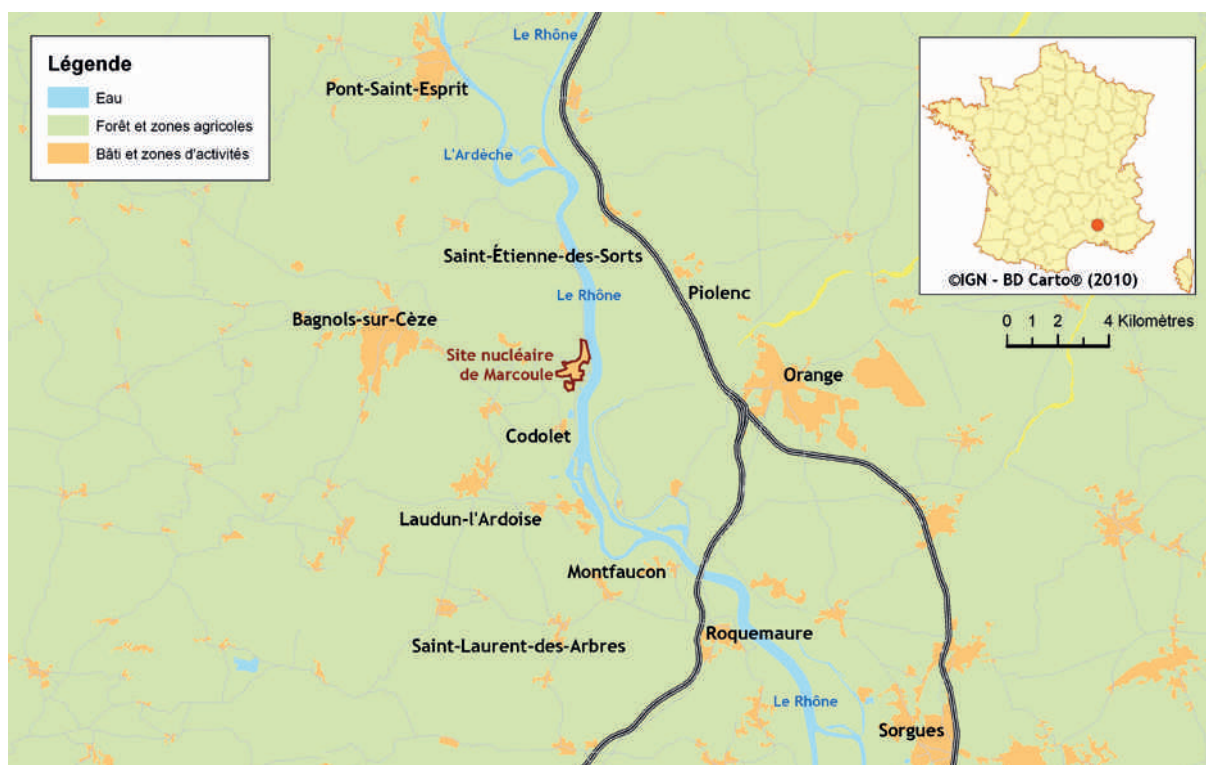


TABLEAU 1 / REJETS DES INSTALLATIONS DE MARCOULE (VALEURS 2012)

Effluents gazeux (INB sauf mention contraire)		Effluents liquides	
Aérosols $\beta\gamma$ (MBq)	5	Émetteurs α (GBq)	1,28 (INBS) + 0,002 (CENTRACO)
Aérosols α (MBq)	0,23	Carbone 14 (GBq)	0,12 (CENTRACO)
Tritium TBq	INB : 0,21 (Atalante et Phénix : 0,0293) INBS : 210 en 2012 (130 en 2013)	Iodes (GBq)	0,21 (INBS) + 0,053 (CENTRACO)
Halogènes (MBq)	14,6	Tritium (TBq)	10 (INBS) + 0,01 (CENTRACO)
Carbone 14 (MBq)	759	Autres émetteurs $\beta\gamma$ (GBq)	84,6 (INBS) + 0,04 (CENTRACO)
Gaz hors tritium (TBq)	44		

FIGURE 2 / ÉVOLUTION DES REJETS TRITIÉS ATMOSPHÉRIQUES (TBq/an)

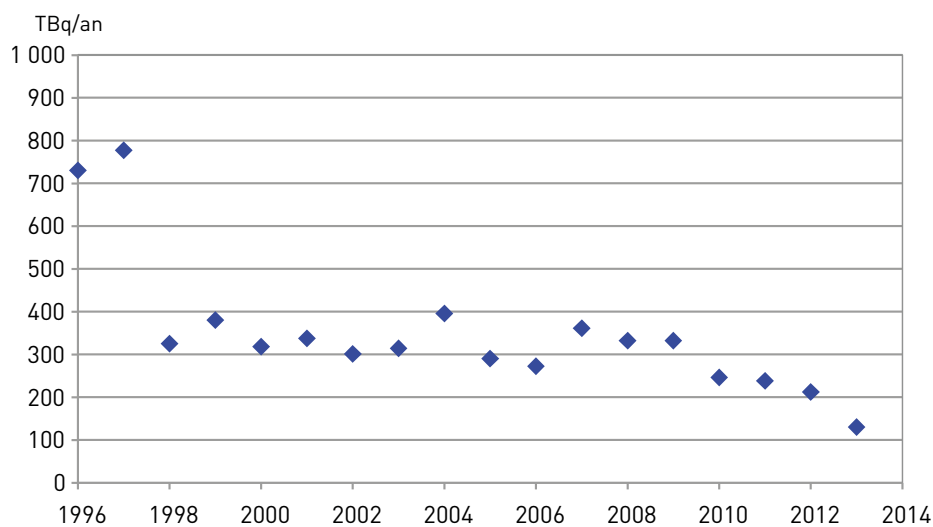


TABLEAU 2 / PLAN DE SURVEILLANCE DE MARCOULE

Milieu surveillé ou nature du contrôle	CEA	IRSN
Air au niveau du sol	4 points de prélèvements et mesures quotidiennes de l'activité α et β global sur filtre. Spectro. γ si α et β global \rightarrow 2 mBq/m ³ . 1 mesure en 2 points (nord et sud) 4 fois par mois de tritium (HTO et HT) de C14 et d'iode 129	Spectro. γ tri-hebdomadaire sur filtres, 1 point (sud)
Rayonnement gamma ambiant	4 balises γ ambiant + 10 dosimètres en bord de clôture	2 balises
Pluie	1 mesure mensuelle en 2 points nord et sud : α et β global ; tritium	1 mesure tritium mensuelle en 1 point (sud)
Milieu récepteur des rejets liquides	Eau du Rhône : Mesures hebdomadaires en 2 points amont-aval sur eau filtrée : indices α et β global ; tritium ; K ; mesure mensuelle sur 1 point à l'aval spectro. γ . sur MES : indice β global hebdomadaire Sédiments : en 2 points : indices α et β global ; spectro. γ , ⁹⁰ Sr (mensuel) ; spectro. α annuel ; en 1 point différent : indices α et β global ; spectro. γ (annuel) Flore aquatique en 1 point : indice β global ; spectro. γ , ⁹⁰ Sr (mensuel) ; tritium ; C14 (annuel) Poissons : 1 point : Indice β global ; spectro. γ , ⁹⁰ Sr (mensuel) ; tritium ; C14 (annuel)	Eau du Rhône : tritium (mensuel) ; indices α et β global (bimestriel) ; spectro. γ , ⁹⁰ Sr, Am/Pu (annuel) Sédiments : spectro. γ (mensuel) ; Sr, Pu, Am (annuel) Flore aquatique en 2 points : spectrométrie gamma, Sr, Pu/Am, U, tritium (trimestriel)
Plan d'eau Codolet	Eau : Indices α et β global ; tritium ; K ; spectro. α (mensuel)	Eau : tritium (semestriel)
Eaux souterraines	6 points en limite de clôture : indices α et β global ; tritium ; K ; (mensuel) 7 points plaine de Codolet : Indices α et β global ; tritium ; K (trimestriel) 1 point annuel (forage P12): Sr 90	-
Végétaux et sol	Végétaux : Indice β global ; spectro. γ (10 points, mensuel) ; plutonium et tritium (3 points, mensuel) ; C14 (2 points, trimestriel) Surface du sol en 2 points : spectro. γ (annuel)	Herbe en 2 points : spectro. γ , tritium, Pu/ Am, Sr (semestriel) Denrées végétales en 2 points : spectro. γ , Pu/ Am, Sr, U (annuel)
Lait	En 1 point : indice β global ; tritium ; spectro. γ (mensuel), ⁹⁰ Sr (annuel)	spectro. γ , tritium, Sr (trimestriel)

Influence du centre de Marcoule sur son environnement et doses associées

• Le tritium

L'influence des rejets de tritium de Marcoule est mesurable dans toutes les composantes de l'environnement du site.

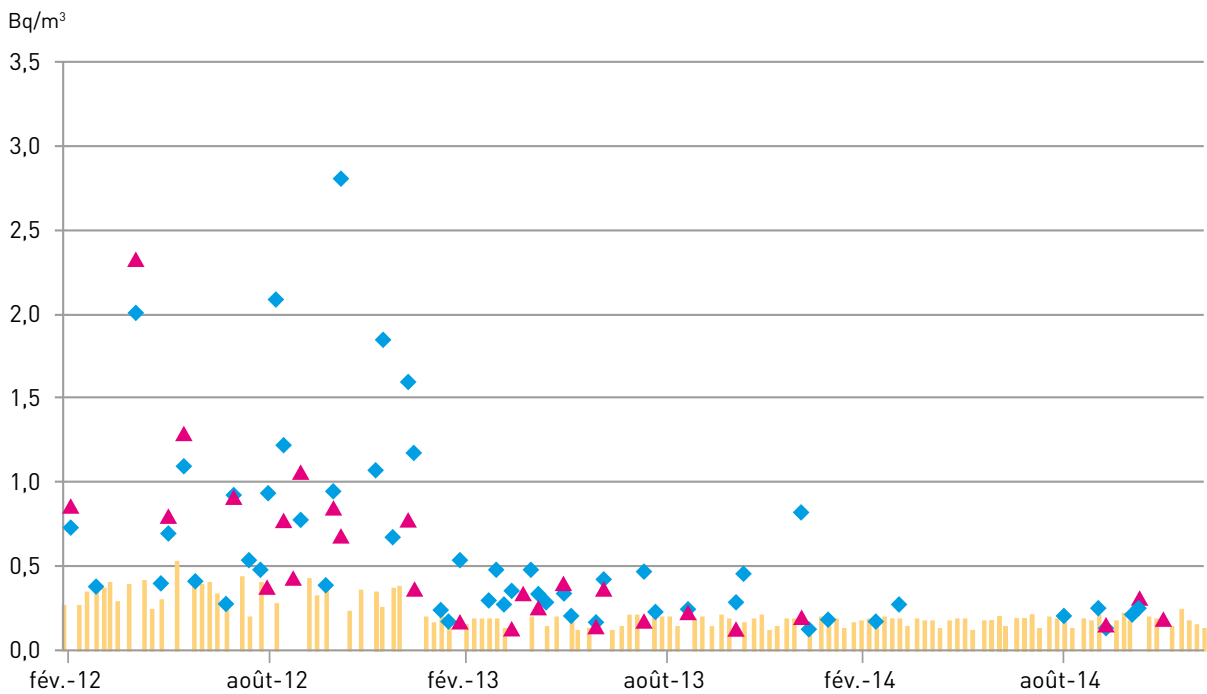
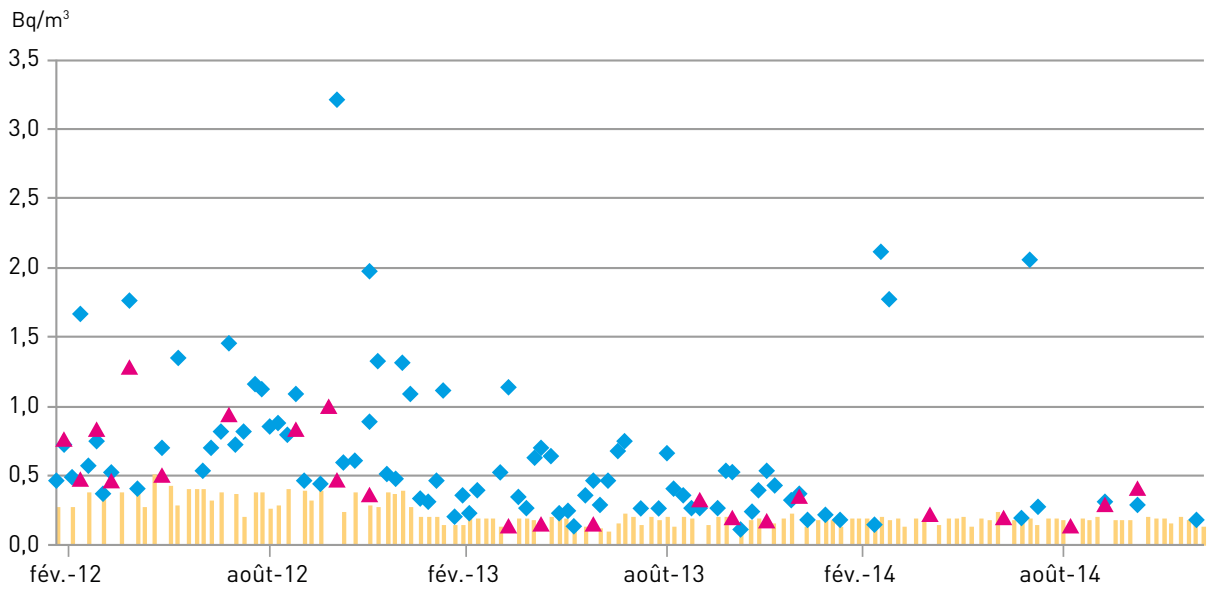
L'activité mesurée dans l'air à Codolet au sud du site est en moyenne de 0,8 Bq/m³ dont 70 % de vapeur d'eau tritiée (HTO) et 30 % de gaz hydrogène tritié (cf. figure 3 et tableau 3). Des valeurs ponctuelles peuvent atteindre 10 fois ces moyennes. Ces activités sont à comparer au bruit de fond actuel du tritium atmosphérique hors influence d'une installation nucléaire : de l'ordre de 0,01 Bq/m³ d'air pour la vapeur d'eau tritiée. Dans les eaux de pluie de Codolet, le tritium est mesurable dans 77 % des échantillons prélevés (cf. figure 4). L'activité volumique est en moyenne de 6,3 Bq/L, à comparer au bruit de fond actuel de 1 à 3 Bq/L. La valeur maximale de 133 Bq/L, observée en février 2013, correspond au bruit de fond dans l'hémisphère Nord au début des années 60 du fait des retombées des essais nucléaires (cf. chapitre 2).

En conséquence de ces activités dans l'air, le tritium est également mesuré dans des herbages et différentes denrées produites localement. Dans des échantillons de lait de chèvre, prélevés trimestriellement à Laudun-l'Ardoise, Roquemaure et Saint-Laurent-des-Arbres, une faible activité en tritium est régulièrement mesurée, en moyenne de 5,4 Bq/L, la valeur maximale de 13,6 Bq/L ayant été observée à Laudun en novembre 2012. Il en est de même des fruits et légumes de Chusclan et Codolet (cf. figure 5) avec une activité moyenne plus élevée de 28 Bq/kg frais (maximum 90 Bq/kg frais en septembre 2012). La

valeur moyenne en tritium de deux échantillons de vin et d'un échantillon de raisin est de 16 Bq/L. Les activités en tritium libre mesurées dans les échantillons d'herbe (cf. figure 6), 10,3 à 67,6 Bq/L à Codolet et 3 à 14,6 Bq/L à Saint-Étienne-des-Sorts sont supérieures aux valeurs du bruit de fond (moins de 3 Bq/L). Toutes ces valeurs sont à comparer au bruit de fond de ce radionucléide en milieu terrestre hors influence d'une installation nucléaire : entre 1 et 3 Bq/kg (ou Bq/L).

Enfin, des mesures faites sur des feuilles de peuplier depuis 2009 prélevées à 0,2 km au sud et 0,8 km au nord du site, afin de suivre l'effet de la diminution des rejets atmosphériques de tritium sur l'activité massique de ces végétaux. En dépit de la variabilité, on constate effectivement une diminution sensible des activités des feuilles d'arbre (cf. figure 6 bis) : l'activité des échantillons prélevés au sud était supérieure à 1 000 Bq/kg frais de 2009 à 2011, alors qu'en 2013 les niveaux ne dépassent pas 600 Bq/kg frais. Au nord, légèrement plus loin et dans l'axe secondaire des vents, les résultats des mesures, naturellement moins élevés qu'au sud, montrent une tendance similaire avec des valeurs diminuant de 600 Bq/kg frais en 2009 à moins de 100 Bq/kg frais en 2014.

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DU TRITIUM MESURÉES DANS L'AIR À PROXIMITÉ DU SITE DE MARCOULE, À CODOLET (GRAPHIQUE DU HAUT) ET SAINT-ÉTIENNE-DES-SORTS (GRAPHIQUE DU BAS) (Bq/m³)



◆ HTO : Vapeur d'eau ▲ HT : Hydrogène tritié
 ■ < SD : Inférieur au seuil de décision

FIGURE 5 / ACTIVITÉS EN TRITIUM LIBRE ET EN CARBONE 14 MESURÉES DANS LES ÉCHANTILLONS DE FRUITS D'ARBRES PRÉLEVÉS À PROXIMITÉ DU SITE DE MARCOULE (Bq/kg frais)

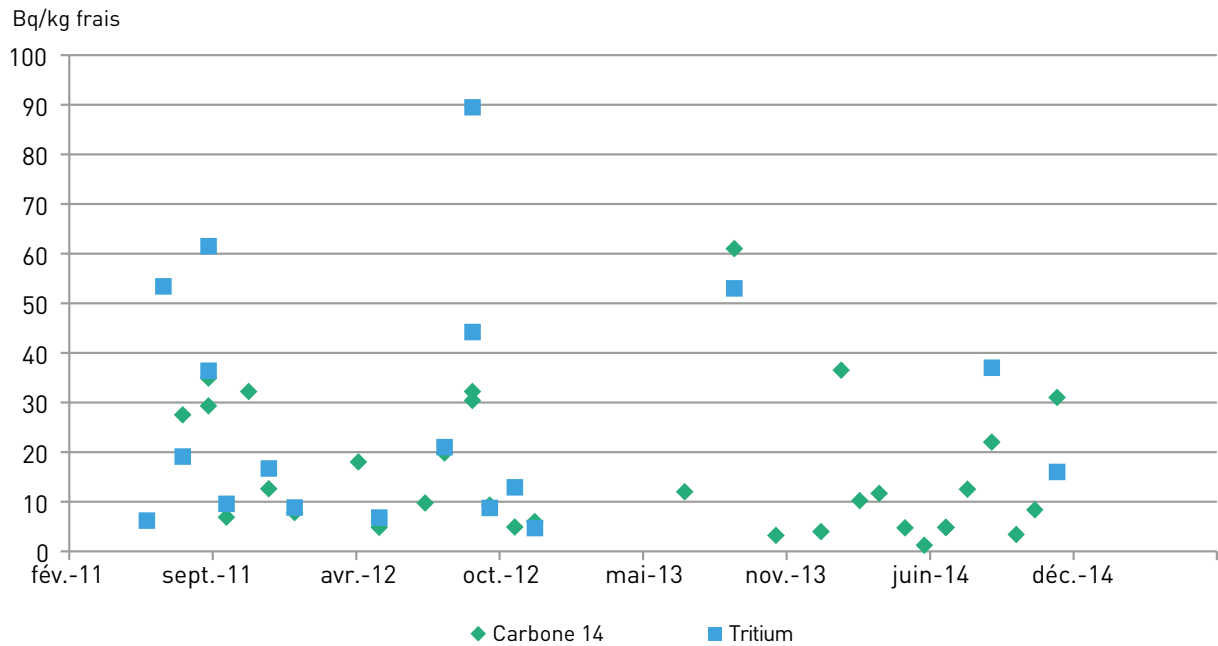


FIGURE 6 / ACTIVITÉS EN TRITIUM LIBRE MESURÉES DANS LES ÉCHANTILLONS D'HERBE PRÉLEVÉS À PROXIMITÉ DU SITE DE MARCOULE (Bq/kg frais)

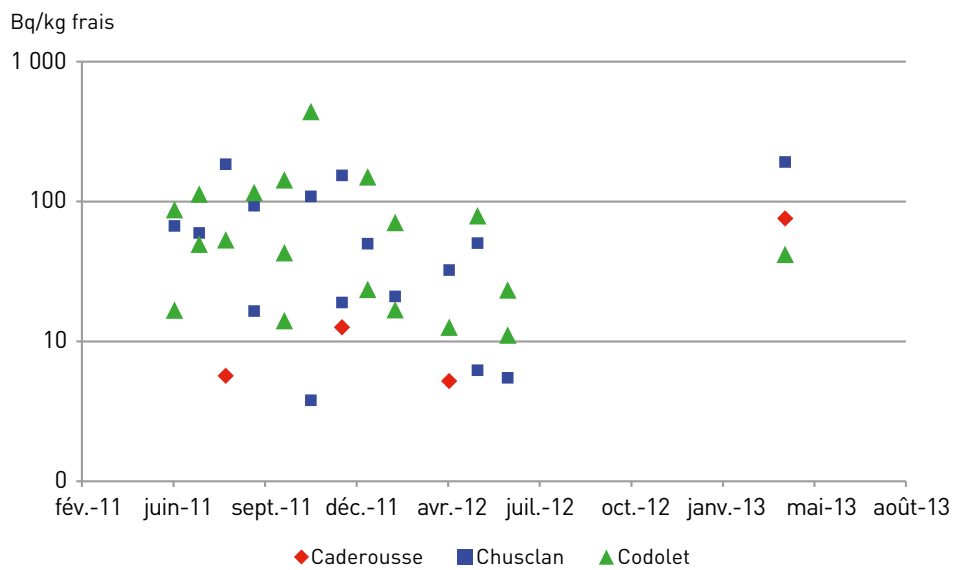
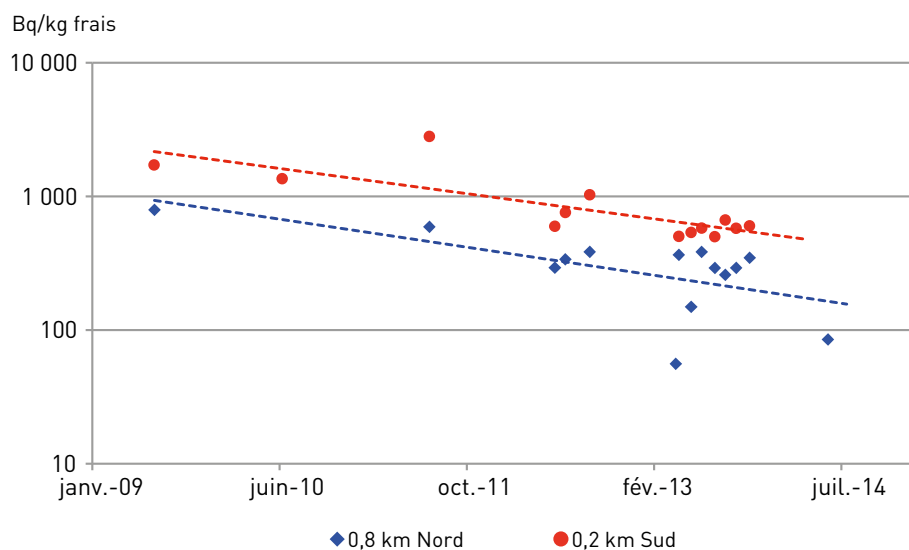


FIGURE 6 BIS / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS DES FEUILLES DE PEUPLIER PRÉLEVÉES
 AU NORD ET AU SUD DU SITE DE MARCOULE (Bq/kg frais)



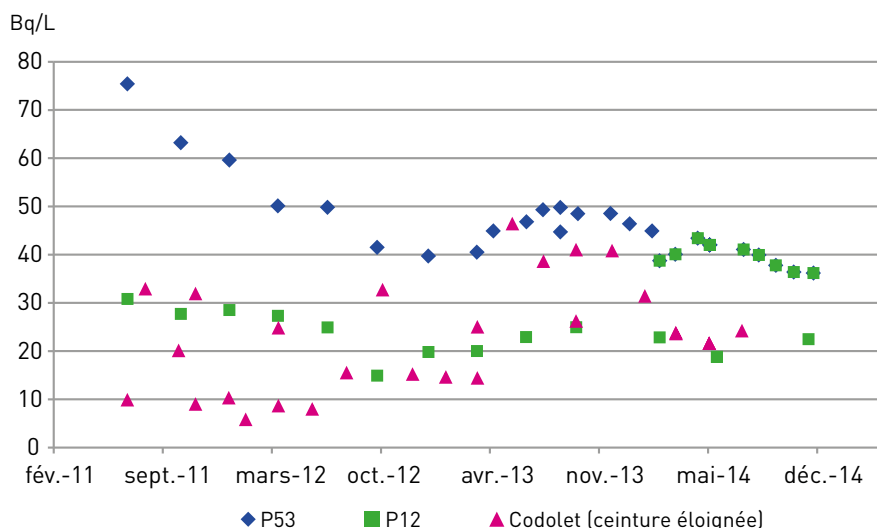
© CEA/Marcoule

Prélèvement d'eau dans l'étang de Codolet

Dans les eaux de nappes phréatiques, le tritium est mesuré dans tous les échantillons (cf. figure 7). À la clôture du site, l'eau des piézomètres présente des activités en tritium allant généralement de 50 à 150 Bq/L (maximum : 435 Bq/L en août 2011). La nappe phréatique s'écoule vers la plaine de Codolet. À l'extérieur, les activités en tritium, décroissent avec l'éloignement du site (P53 > P92 > Codolet) avec des activités moyennes respectives de : 50, 28 et 18 Bq/L. Le point le

plus éloigné (Codolet) a vu son activité diminuer d'un facteur 2 environ de 2011 à 2012. Dans les échantillons d'eaux de boisson des communes de Caderousse et Chusclan, prélevés mensuellement, les résultats d'analyses sont inférieurs au seuil de décision de 4 Bq/L, alors que l'activité en tritium des eaux de l'AEP de Codolet est toujours mesurable avec une moyenne de 11,6 Bq/L pour un maximum de 33 Bq/L en novembre 2012.

FIGURE 7 // ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS LES EAUX DE NAPPE PHRÉATIQUE PRÉLEVÉES AU SUD DE MARCOULE (Bq/L)



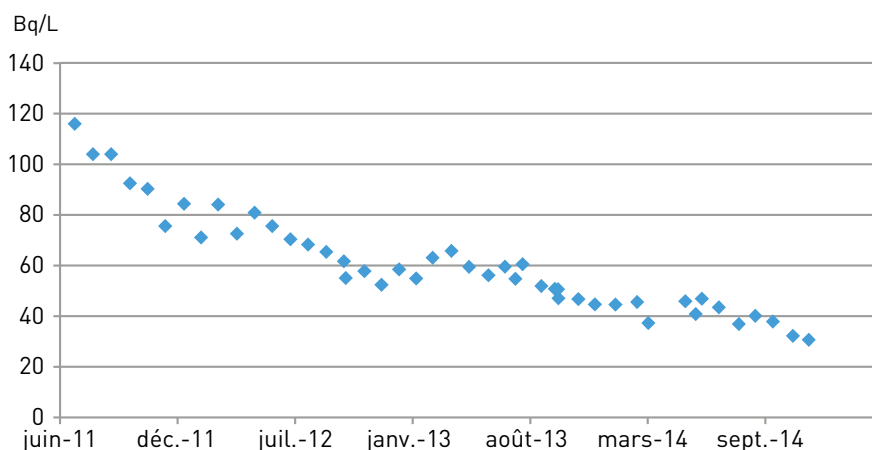
Prélèvement d'herbe au nord de Marcoule

© Areva NC

Le tritium est également mesurable dans toutes les eaux superficielles. Celles de l'étang de Codolet sont mesurées mensuellement (cf. figure 8) à des niveaux qui ont diminué entre 2011 et 2014, passant d'une centaine de Bq/L à une quarantaine de Bq/L, en cohérence avec la diminution des eaux de la nappe. Le tritium présent dans l'eau du Rhône aval provient essentiellement des rejets d'effluents liquides des CNPE (environ 95 % des rejets dans le Rhône) auxquels s'ajoutent le bruit de fond rémanent ainsi que les rejets des installations Areva de Pierrelatte. Le centre de Marcoule est un contributeur secondaire à ces rejets mais par sa position aval, voit « passer » tout le tritium rejeté à

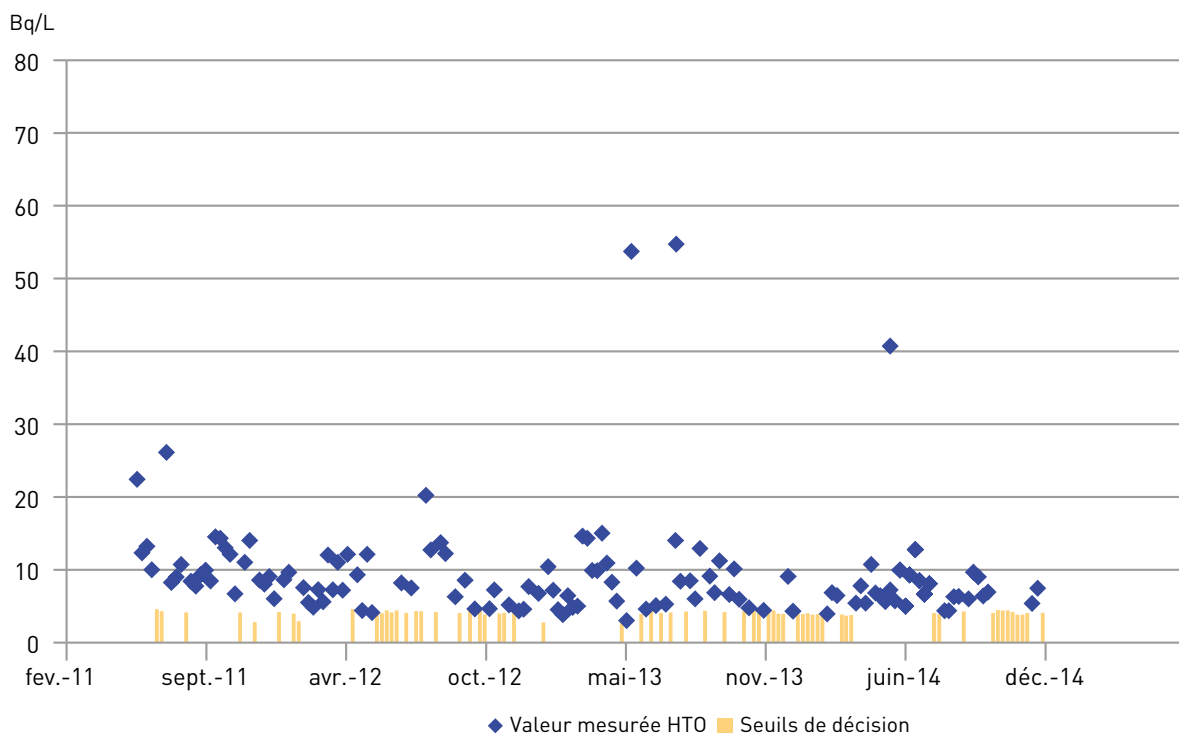
l'amont du Rhône. Sur la période récente (mi 2011 - mi 2014), l'activité volumique moyenne en tritium à l'aval du site est de l'ordre de 8 Bq/L, cohérente avec l'activité théorique moyenne annuelle du fleuve². Quelques valeurs temporairement plus élevées apparaissent (maximum : 55 Bq/L en juillet 2013). Le pourcentage de résultats supérieurs au seuil de décision est de 65 % (cf. figure 9). Les niveaux de tritium relevés dans les plantes aquatiques (phanérogames) sont variables et témoignent irrégulièrement d'un marquage par les rejets d'effluents liquides du site de Marcoule auxquels s'ajoutent ceux des centres nucléaires de production d'électricité situées en amont sur le Rhône.

FIGURE 8 / ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS L'EAU COLLECTÉE DANS L'ÉTANG DE CODOLET AU SUD DE MARCOULE (Bq/L)



2. Avec un débit moyen annuel du Rhône au droit de Marcoule de l'ordre de 1 400 m³/s, la concentration moyenne annuelle ajoutée en tritium par la totalité des rejets liquides de toutes les installations rhodaniennes, déduction faite du bruit de fond de 3 Bq/L environ, est de l'ordre de 7,5 Bq/L.

FIGURE 9 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES EN TRITIUM DES EAUX DU RHÔNE PRÉLEVÉES EN AVAL DU SITE DE MARCOULE (Bq/L)



Largement prépondérant dans les rejets et dans les activités observées dans l'environnement du site, le tritium est le principal contributeur à la dose liée aux rejets de Marcoule : l'estimation faite par le CEA^{3,4} à partir des rejets réels de 2013 indique que 99 % de la dose efficace totale pour l'adulte sont dus au tritium émis par voie atmosphérique. L'impact estimé par le CEA pour les installations civiles est négligeable (0,29 μ Sv pour les rejets gazeux et 0,0007 μ Sv pour les rejets liquides) par rapport à celui de l'INBS (7,8 μ Sv).

Pour évaluer la dose relative au tritium sur la base des activités mesurées dans l'environnement, les voies d'exposition considérées sont :

l'ingestion de denrées et d'eau, l'inhalation et l'incorporation percutanée. La dose efficace est évaluée pour l'adulte.

Concernant l'ingestion, la ration considérée est issue des résultats de deux enquêtes locales. Une enquête relative à Marcoule⁵ a été faite en période estivale ; une enquête relative à Tricastin réalisée en hiver⁶ permet de déduire des résultats pour la période hivernale dans une région proche. La ration annuelle considérée sera donc supposée être constituée pour moitié (6 mois par an) de la ration « MARCOULE ÉTÉ » et pour moitié (6 mois par an) de la ration « TRICASTIN HIVER »⁷. Les quantités consommées sont affectées du taux d'autoconsommation de

3. CEA, Rapport public annuel de 2013 (INBS).

4. CEA, Rapport transparence et sécurité nucléaire 2013 (INB).

5. Parache V. (2011). Enquête alimentaire autour du site nucléaire du CEA de Marcoule : méthodologie et résultats. Rapport IRSN/DEI/SESURE-2011-07.

6. Parache V. (2010). Résultats de l'enquête alimentaire autour du site nucléaire de Pierrelatte - Tricastin (2004-2005). Rapport IRSN/DEI/SESURE-2010-31.

7. La ration prise en compte habituellement est celle de Marcoule.

produits locaux. La consommation standard d'eau de boisson (2 L/j) est diminuée du volume de consommation de vin local (45 L/an). Les activités massiques et volumiques du tritium sont déduites des valeurs moyennes mesurées sur la période mi-2011 à mi-2014. Concernant le fromage, en l'absence de résultats de mesures, on utilise une valeur estimée à 10 fois la consommation de lait compte tenu d'un facteur de transformation de l'ordre de

10 L de lait (de chèvre) par kilogramme de fromage. Les quantités ingérées et les activités en tritium considérées pour ce calcul sont reportées tableau 4.

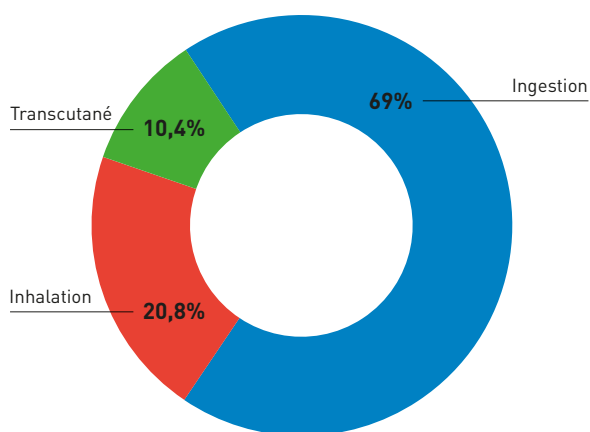
Le résultat du calcul aboutit à une dose de 0,28 µSv/an dont plus de la moitié imputable à l'ingestion d'eau de boisson et 42 % à celle de denrées végétales (cf. figure 10).

TABLEAU 4 / RATION ET ACTIVITÉ MASSIQUE OU VOLUMIQUE PRISES EN COMPTE DANS LE CALCUL DE DOSE PAR INGESTION

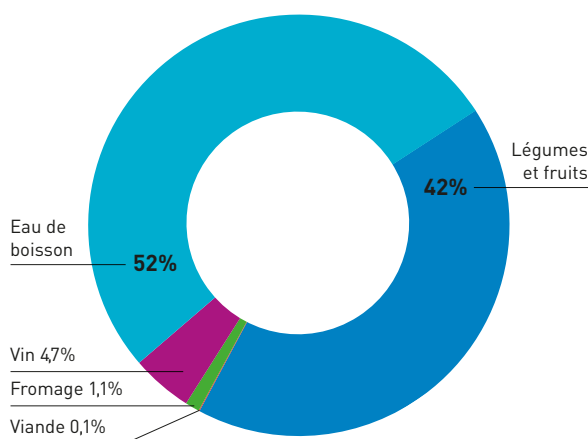
Denrées	Ration auto-consommée kg/an ou litre/an	Tritium (Bq/kg frais ou Bq/L)
Légumes + fruits	186	28
Viandes	26	1,5
Fromage	4	5,4
Vin	45	16
Eau de boisson	685	11,6

FIGURE 10 / ESTIMATION, À PARTIR DES MESURES DE LA SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE, DES DOSES LIÉES AUX REJETS ATMOSPHÉRIQUES DE TRITIUM : CONTRIBUTION DES VOIES D'ATTEINTE À LA DOSE TOTALE ET CONTRIBUTION DES DENRÉES À LA DOSE PAR INGESTION

10-A / Contribution des voies d'atteinte à la dose totale



10-B / Contribution des denrées à la dose par ingestion de 0,28 µSv/an



Pour l'exposition par inhalation et par voie transcutanée, la dose est évaluée pour un individu séjournant à Codolet 100 % de son temps avec la valeur d'activité de l'air moyenne mesurée sur cette commune (valeurs inférieures aux seuils de décision incluses), soit 0,55 Bq/m³ de vapeur d'eau HTO et 0,27 Bq/m³ d'hydrogène tritié HT.

Dans ces conditions, la dose liée à l'inhalation et à l'incorporation percutanée est de 0,12 µSv/an (due quasi exclusivement à la forme HTO : la dose due à la forme HT est de 6×10^{-6} µSv/an).

La dose totale ainsi calculée (0,4 µSv/an) est inférieure de plus d'un ordre de grandeur à celle évaluée par l'exploitant avec des méthodes purement calculatoires (dispersion, transfert) à partir des rejets atmosphériques réels de tritium de 2013. Il est probable que les modèles et paramètres de transfert utilisés dans l'évaluation de l'exploitant pour le tritium atmosphérique sont majorants.

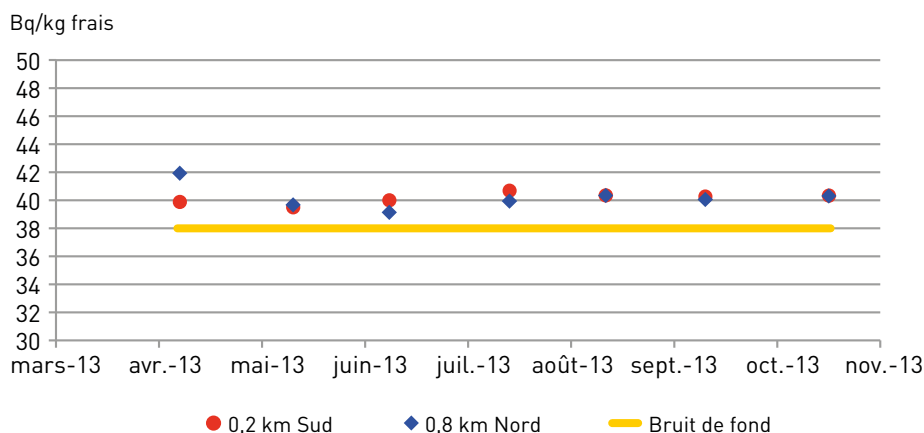
• Les autres radionucléides

Outre le tritium, le carbone 14 est également mesuré dans des herbages, des fruits et légumes et des poissons du Rhône. Les activités en ¹⁴C mesurées dans les herbages présentent une très grande variabilité, de 24 à 314 Bq/kg sec (cf. tableau 5). Cette variabilité autour de l'activité normale de l'ordre de 100 Bq/kg sec (due au carbone 14 naturel et à la rémanence des retombées des essais nucléaires), vraisemblablement liée à la technique de mesure utilisée, ne permet pas de conclure sur l'influence des rejets du site. Il en est de même des activités de ¹⁴C mesurées dans les échantillons de fruits et de légumes allant de 10 à 36 Bq/kg frais. En revanche, les résultats de mesures de prélèvements de feuilles de peupliers faites en 2013 chaque mois durant la saison de végétation, sur deux stations, à 0,2 km au sud et 0,8 km au nord du site (cf. figure 10 bis) sont assez constants. L'activité des échantillons prélevés a varié entre 39 et 42 Bq/kg frais (234 et 250 Bq/kg C), sans différence significative entre les deux stations. Ces résultats témoignent d'un très léger surcroît d'activité (quelques pourcents) par rapport au bruit de fond moyen, hors de tout rejet atmosphérique.

TABLEAU 5 / ACTIVITÉS MESURÉES DANS LES HERBES

	¹³⁷ Cs (Bq/kg sec)	⁹⁰ Sr (Bq/kg sec)	Tritium (Bq/kg frais)
Codolet	0,8 à 3,2	0,4 à 0,7	10,8 à 428 (moyenne : 77)
Chusclan	0,52 à 2,2		192 à 3,8 (moyenne : 67)
Saint-Étienne-des-Sorts		0,3 à 0,4	
Caderousse			5,2 à 75,6 (moyenne : 25)

FIGURE 10 BIS / ACTIVITÉS DU CARBONE 14 DANS LES FEUILLES DE PEUPLIERS PRÉLEVÉES
 AU SUD ET AU NORD DE MARCOULE (Bq/kg frais)



Les activités en ^{14}C mesurées dans les poissons (cf. tableau 6) pêchés en aval du site, de 34 à 320 Bq/kg frais pour une moyenne de 180 Bq/kg frais, à comparer à un bruit de fond naturel de l'ordre de 30 Bq/kg frais, témoignent de l'influence des rejets des CNPE d'EDF situés en amont.

Des échantillons de sédiments sont prélevés en amont et en aval du site, à Saint-Étienne-des-Sorts, Codolet et Roquemaure (cf. figure 11 et figure 12). En amont, seuls sont détectés du

^{137}Cs (2,9 Bq/kg sec) et des traces d'américium et de plutonium 239 issus des retombées des essais nucléaires et dans le cas du césium de l'accident de Tchernobyl. En aval, des traces de ^{60}Co ainsi que des activités en ^{241}Am , ^{238}Pu , ^{239}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ plus élevées qu'en amont sont mesurées. Le rapport des activités, $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$, montre que cet excès de plutonium dans les sédiments provient des effluents rejetés par Marcoule dans le passé (cf. tableau 7). Il en est de même de l'américium 241.

TABLEAU 6 / ACTIVITÉS MESURÉES DE MI-2011 À MI-2014 DANS LES POISSONS PÊCHÉS À LAVAL DU SITE DE MARCOULE

Radionucléide	Poisson non identifié
^{137}Cs	< 0,2 à 0,56 Bq/kg frais (moyenne : 0,31 Bq/kg frais)
^3H	6,6 à 10 (Bq/kg frais)
^{14}C	34 à 320 Bq/kg frais (moyenne : 180 Bq/kg frais, soit 1 440 Bq/kg C)

FIGURE 11 / ACTIVITÉS MESURÉES DANS LES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS EN JUIN 2012 À SAINT-ÉTIENNE-DES-SORTS (AMONT) ET À CODOLET (AVAL) (Bq/kg sec)

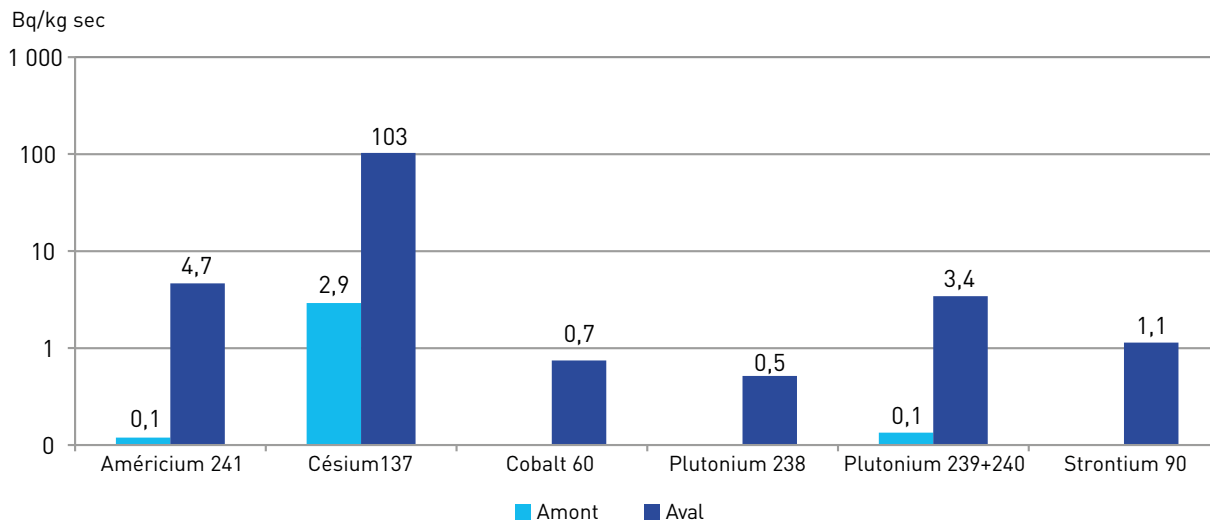
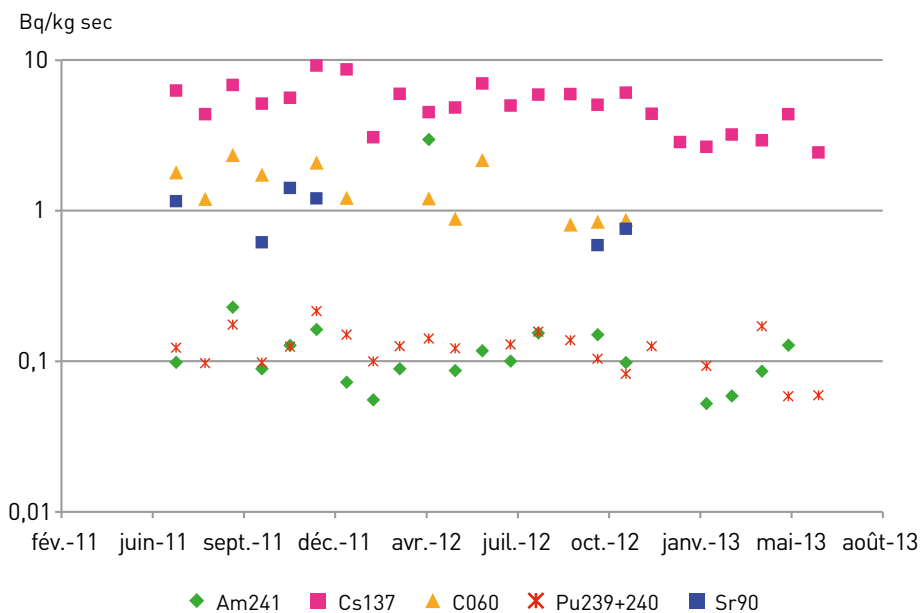


FIGURE 12 / ACTIVITÉS MESURÉES DANS LES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS À ROQUEMAURE (AVAL LOINTAIN) (Bq/kg sec)



Les analyses de végétaux aquatiques (algues, phanérogames, cf. tableau 8), indiquent la présence de traces de ces mêmes radionucléides, en amont comme en aval du site, imputables essentiellement à la radioactivité rémanente des retombées atmosphériques anciennes.

Toutes les autres mesures acquises dans l'environnement du site de Marcoule reflètent soit le bruit de fond de la radioactivité naturelle, soit la rémanence des retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl et des essais d'armes nucléaires (cf. chapitre 2).

TABLEAU 7 / RAPPORTS DES ISOTOPES DU PLUTONIUM $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ DANS LES ÉCHANTILLONS DE SÉDIMENTS PRÉLEVÉS EN JUIN 2012 À L'AMONT ET À L'AVAL DE MARCOULE

Saint-Étienne-des-Sorts (amont)	Codolet (aval)	Rapports théoriques caractéristiques
< 0,07	0,15	Retombées des essais nucléaires : 0,03 Retraitement civil du combustible usé : 0,3 Lié aux activités de défense : 0,05

TABLEAU 8 / ACTIVITÉS MOYENNES MESURÉES DANS LES VÉGÉTAUX AQUATIQUES PRÉLEVÉES DANS LE RHÔNE EN AMONT ET EN AVAL DU SITE DE MARCOULE (Bq/kg frais)

	Tritium	^{90}Sr	^{14}C	^{137}Cs	^{241}Am	^{238}Pu	$^{239+240}\text{Pu}$
Saint-Étienne-des-Sorts	0,29	0,13 à 0,26		0,1 à 0,25	0,003		0,003
Codolet	0,67 à 7,05	0,12 à 0,32		0,3	0,001 à 0,022	0,002 à 0,08	0,019
Caderousse	5,1	1,42	5 à 103	0,1 à 0,4			

Le site de Valduc

Rejets et plans de surveillance

Le centre du CEA de Valduc (Côte-d'Or), créé en 1957 et situé à 45 km au nord-ouest de Dijon (cf. figure 1), est dédié aux études et développements technologiques sur les composants

d'armes nucléaires. Ce site rejette, sous contrôle réglementaire, principalement du tritium par voie atmosphérique. De ce fait, le plan de surveillance réglementaire du CEA et le plan de surveillance de l'IRSN sont particulièrement dédiés à la surveillance de ce radionucléide (cf. tableau 1). Les rejets de tritium ont fortement décroché depuis les années 75 ; ils sont de 272 TBq/an en 2013 contre plus de 20 000 TBq/an à l'époque (cf. figure 2).

FIGURE 1 / IMPLANTATION GÉOGRAPHIQUE DU SITE CEA DE VALDUC

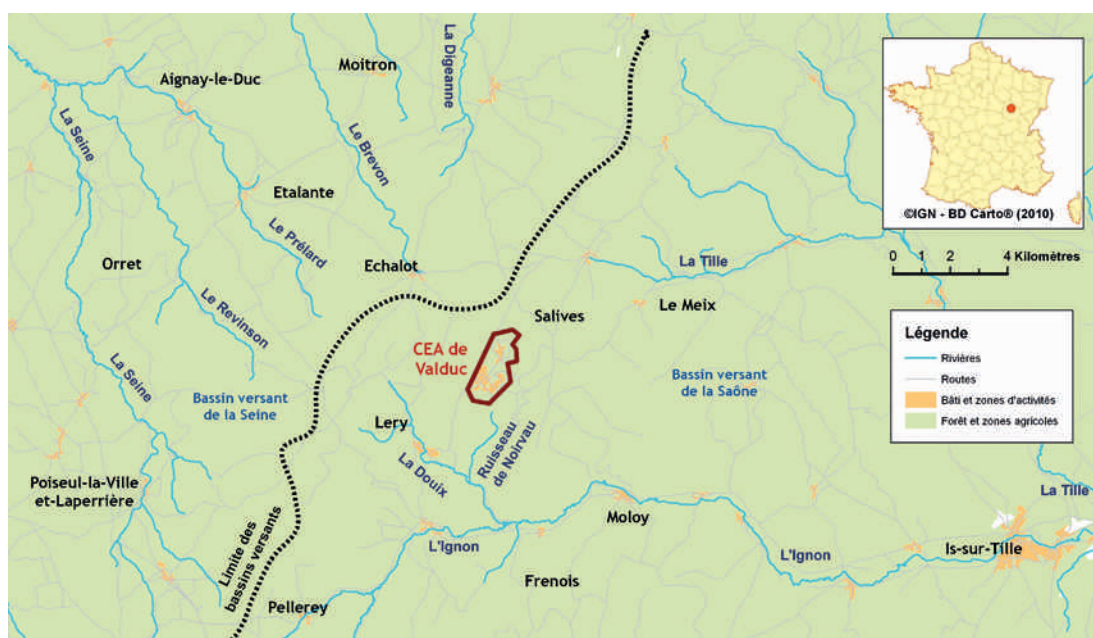


FIGURE 2 / REJETS D'EFFLUENTS ATMOSPHÉRIQUES DE TRITIUM DU SITE DE VALDUC (TBq/an)

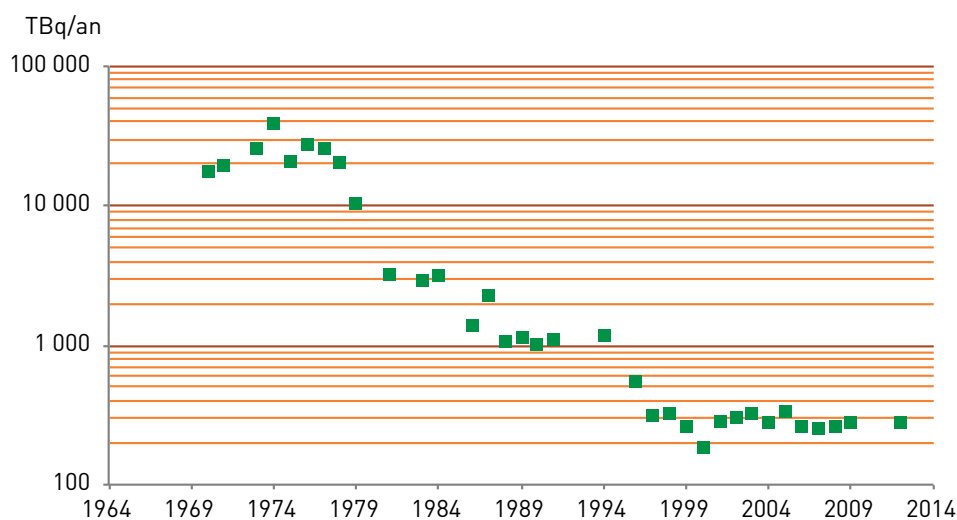


TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DU SITE DE VALDUC

Plan de surveillance réglementaire de l'environnement du CEA pour le site de Valduc (en 2014).

Catégorie	Lieu de prélèvement	Nature du prélèvement	Fréquence du prélèvement et de l'analyse	Paramètres analysés
Atmosphère	Moloy Léry Echalot Salives	Barboteur (air)	Hebdomadaire	Tritium (HT - HTO)
		Filtre (air)	Hebdomadaire et quotidien (Salives)	Alpha-bêta global
		Eau de pluie	Hebdomadaire	Tritium
Chaîne alimentaire	Larçon (Salives)	Lait	Mensuelle	Tritium et spectrométrie gamma
	Moloy Léry Echalot Salives	Herbe	Mensuelle	Tritium libre Spectrométrie gamma (rotation mensuelle)
Eaux de surface	Echalot (étang), Moloy (Igonn), Salives (Tille), Léry (Douix aval) Site de Valduc (Grand Etang)	Eau	Mensuelle	Alpha-bêta global Spectrométrie gamma Tritium

Plan de surveillance (2014) de l'IRSN pour le site de Valduc.

Catégorie	Lieu de prélèvement	Nature	Fréquence	Paramètres analysés
Ambiance	CEA de Valduc (intra-site)	-	Continue	Débit de dose (Téléray)
Atmosphère	Station AS1 - Mont-Armet (Salives)	Aérosols	3 fois par semaine	Spectrométrie gamma sur regroupement mensuel
		Gaz (barboteur)	bi-mensuelle	Tritium (HTO - HT)
		Eau de pluie	Mensuelle	Tritium
Denrées et bio-indicateurs	Lamargelle Echalot	Lait de vache	Trimestrielle	Tritium libre
	Lamargelle	Miel	Annuelle	Tritium libre et lié
	Fraignot-et-Vesvrotte	Blé	Annuelle	Spectrométrie gamma, Tritium lié
	Salives	Végétaux cultivés	Annuelle	Tritium libre et lié
	3 points	Herbe	Annuelle	Tritium libre
	5 points	Arbres (feuilles)	Annuelle	Tritium libre et lié
Eaux de surface	Léry (Ruisseau Le Noirveau)	Eau	Semestrielle	Tritium, alpha - bêta global, spectrométrie gamma, K
	8 points	Eau	Semestrielle	Tritium, bêta global, K
Eau de source ou résurgences	8 points	Eau	Semestrielle	Tritium, bêta global, K

Influence du site de Valduc sur son environnement

L'influence des rejets de tritium du centre de Valduc est observable dans toutes les composantes de l'environnement. Dans l'air, le niveau moyen du tritium (cf. tableau 2) est de :

- 0,5 Bq/m³ (0,2 à 0,7 selon les stations) pour la vapeur d'eau tritiée : HTO
- 0,2 Bq/m³ (0,12 à 0,32 selon les stations) pour l'hydrogène tritié : HT.

La figure 3 présente les variations hebdomadaires autour de ces valeurs. Ces activités sont à comparer au bruit de fond actuel du tritium atmosphérique hors influence d'une installation nucléaire : de l'ordre de 0,01 Bq/m³ d'air pour la vapeur d'eau tritiée.

Dans les eaux de pluie, les moyennes des activités mensuelles mesurées pour les 4 stations de prélèvement vont de 5 Bq/L (Lery) à 22 Bq/L (Salives), avec des maxima qui ont pu atteindre 488 Bq/L en 2011 (cf. tableau 3 et figure 4). Ces moyennes sont jusqu'à 20 fois supérieures au bruit de fond actuel de 1 à 3 Bq/L. À titre de comparaison, la valeur moyenne observée à Salives correspond au bruit de fond tritié qui existait partout dans l'hémisphère Nord au début des années 70 du fait des retombées des essais nucléaires ; la valeur maximale correspond quant à elle au niveau qui prévalait au début des années 60 (cf. chapitre 2).

TABLEAU 2 / ACTIVITÉS DU TRITIUM SOUS FORME DE VAPEUR D'EAU (HTO) ET SOUS FORME D'HYDROGÈNE TRITIÉ (HT) MESURÉES HEBDOMADAIREMENT DANS L'AIR

Station (origines des données)	HTO		HT	
	Valeur moyenne (Bq/m ³)	Valeur maximale (Bq/m ³)	Valeur moyenne (Bq/m ³)	Valeur maximale (Bq/m ³)
Echalot (CEA)	0,67	3,2 (juin 2014)	0,15	0,7 (mai 2014)
Lamargelle (CEA)	0,32		0,15	
Moloy (CEA)	0,20		0,12	
Salives (CEA)	0,47		0,14	
Salives (IRSN)	0,72		0,32	
Toutes stations	0,48		0,17	



Prélèvement d'eau de la source de la Coquille à Etalante

© IRSN

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DU TRITIUM SOUS FORME DE VAPEUR D'EAU (HTO) ET SOUS FORME D'HYDROGÈNE TRITIÉ (HT) MESURÉES HEBDOMADAIREMENT DANS L'AIR À ÉCHALOT (Bq/m³)

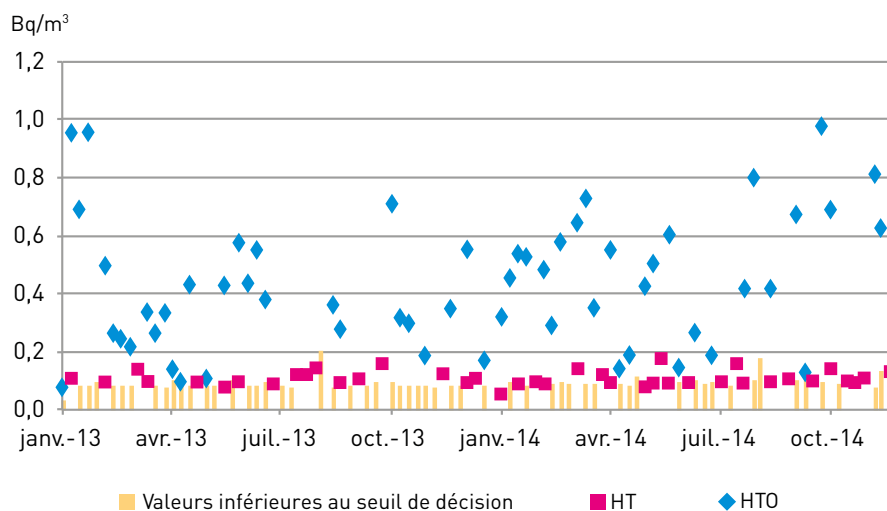
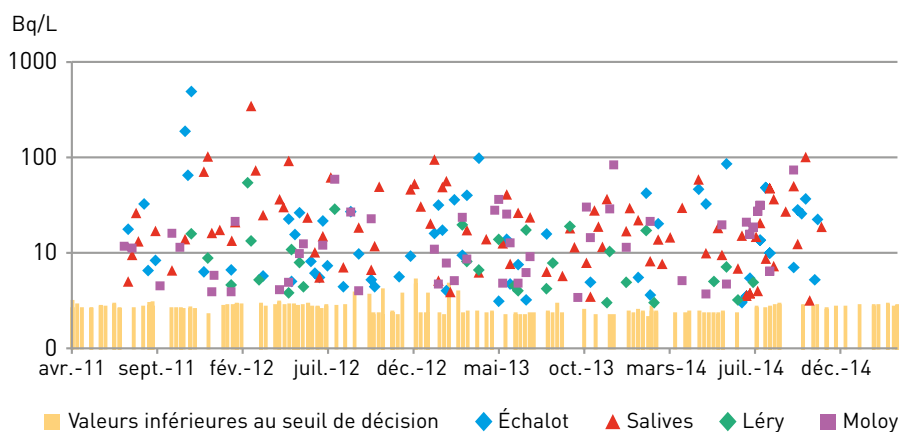


TABLEAU 3 / ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE (Bq/L)

Pluie Bq/L	Moyenne Bq/L	Maximum Bq/L (date)
Echalot (CEA)	16,5	488 (nov.-2011)
Léry	5,1	54 (fév.-2012)
Moloy	9,5	83 (nov.-2013)
Salives	22,1	338 (fév.-2012)

FIGURE 4 / ACTIVITÉS DU TRITIUM MESURÉES DANS L'EAU DE PLUIE À PROXIMITÉ DU CENTRE DU CEA DE VALDUC (Bq/L)



Dans les échantillons d'eaux de nappes phréatiques, de sources et de fontaines publiques, les activités en tritium qui ont été mesurées (supérieures au seuil de décision) varient de moins de 5 Bq/L à 79 Bq/L (cf. figure 5). Les valeurs les plus élevées sont observées à Salives (moyenne de 55 Bq/L) et au Meix (moyenne de 28 Bq/L). Le marquage en tritium reste relativement faible sur les autres stations : 8 Bq/L en moyenne. Ces résultats sont en bon accord avec ceux de la SEIVA¹ qui analyse chaque année les eaux de boisson et estime leur activité actuelle autour de 10 à 20 Bq/L.

L'influence du centre de Valduc sur l'activité en tritium des eaux de rivières est également avérée : en moyenne 18 Bq/L (Le Brévon) à 39 Bq/L dans La Tille (cf. figure 6). Les ruisseaux qui drainent superficiellement le dôme de Valduc sur lequel est situé le centre présentent des activités en tritium élevées, avec une valeur maximale de 169 Bq/L dans le ruisseau Le Noirveau. Enfin, Le Grand Étang (sur le site) présente une activité moyenne de 200 Bq/L, avec une tendance à la baisse ces dernières années.



Prélèvement d'un filtre aérosol dans l'environnement de Marcoule

1. Structure d'échange et d'information sur Valduc.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS EN TRITIUM MESURÉES DANS LES EAUX SOUTERRAINES PRÉLEVÉES À PROXIMITÉ DU CEA DE VALDUC (Bq/L)

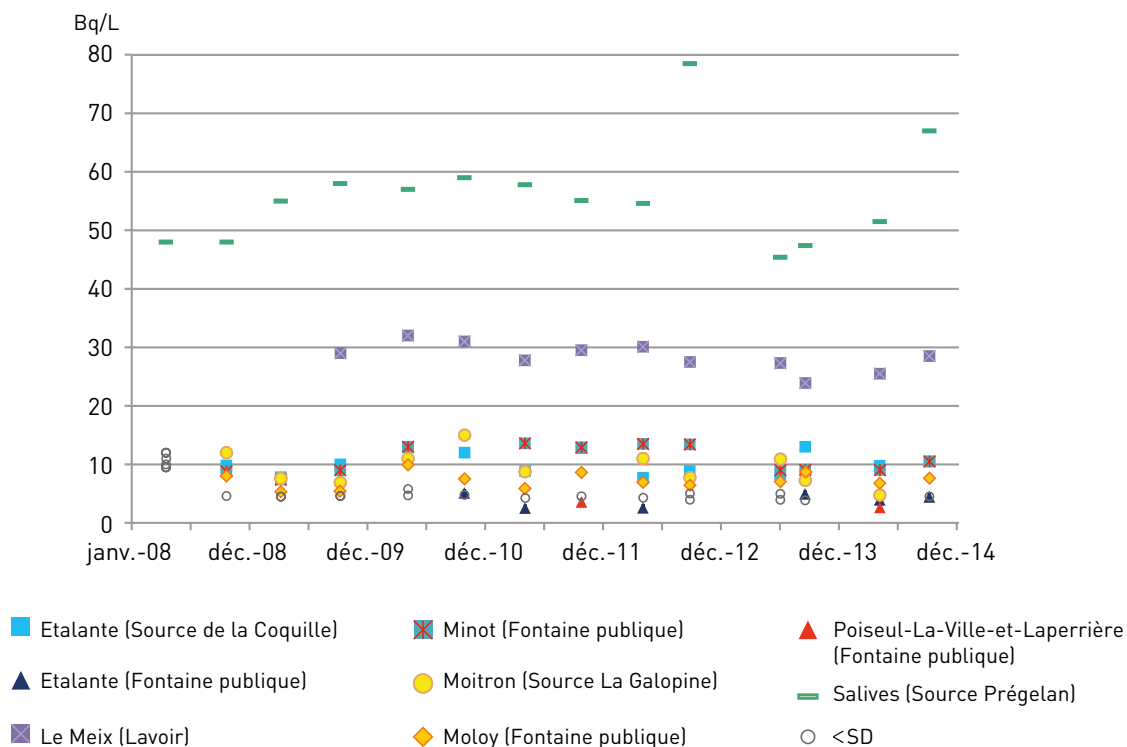
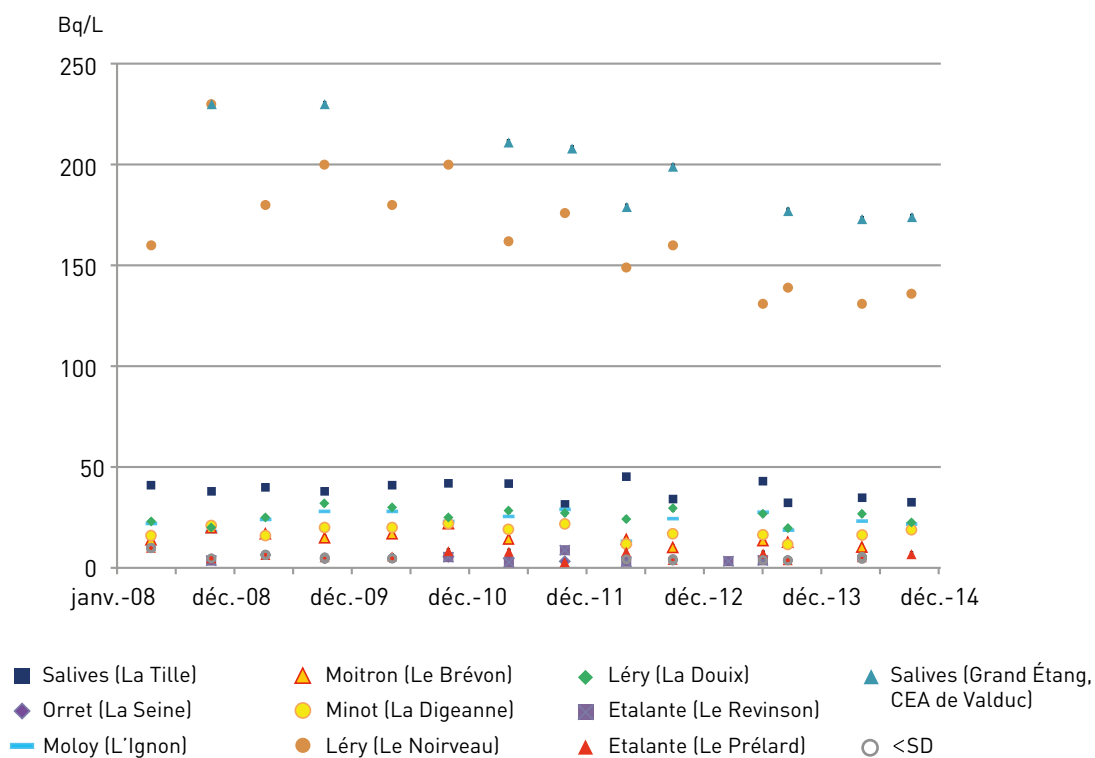


FIGURE 6 / ACTIVITÉS EN TRITIUM MESURÉES DANS LES EAUX DE SURFACES PRÉLEVÉES AUTOUR DU CEA DE VALDUC (Bq/L)



Des analyses de tritium libre dans l'herbe et le lait sont effectuées régulièrement sur plusieurs stations proches du site (cf. figure 7 et figure 8). Les valeurs moyennes sont de 23 Bq/kg frais dans l'herbe (maximum de 135 Bq/kg frais en mai 2013) et de 14 Bq/L de lait (maximum de 30 Bq/L de lait en septembre 2012), variant en moyenne de 5 Bq/L à Lamargelle à 25 Bq/L à Salives.

De la viande de bœuf élevée à proximité de Valduc est prélevée annuellement. On observe un très léger marquage en tritium, avec une activité de l'ordre de 1 Bq/kg frais (tritium organiquement lié : 3,7 Bq/L). Du miel produit en 2012 sur la commune de Lamargelle présente également un léger marquage : 10,4 Bq/kg frais. Il en est de même du blé avec des activités comprises entre

6 et 54 Bq/kg frais. Enfin, des feuilles annuelles d'arbres (bio-indicateur) prélevées à distances croissantes du centre ont des activités en tritium lié allant de 368 Bq/kg frais (Salives) à 18 Bq/kg frais (Vernois) en s'éloignant du site.

Par ailleurs, la SEIVA réalise annuellement des analyses de denrées végétales cultivées dans les communes avoisinantes. En 2013, les dernières analyses montrent un niveau en tritium des légumes de l'ordre de 20 à 30 Bq/kg frais.

Les activités en tritium mesurées dans toutes ces composantes de la chaîne alimentaire sont à comparer au bruit de fond actuel qui est de l'ordre de 1 à 3 Bq/kg frais.

FIGURE 7 / ACTIVITÉS DU TRITIUM MESURÉES DANS L'HERBE (Bq/kg frais)

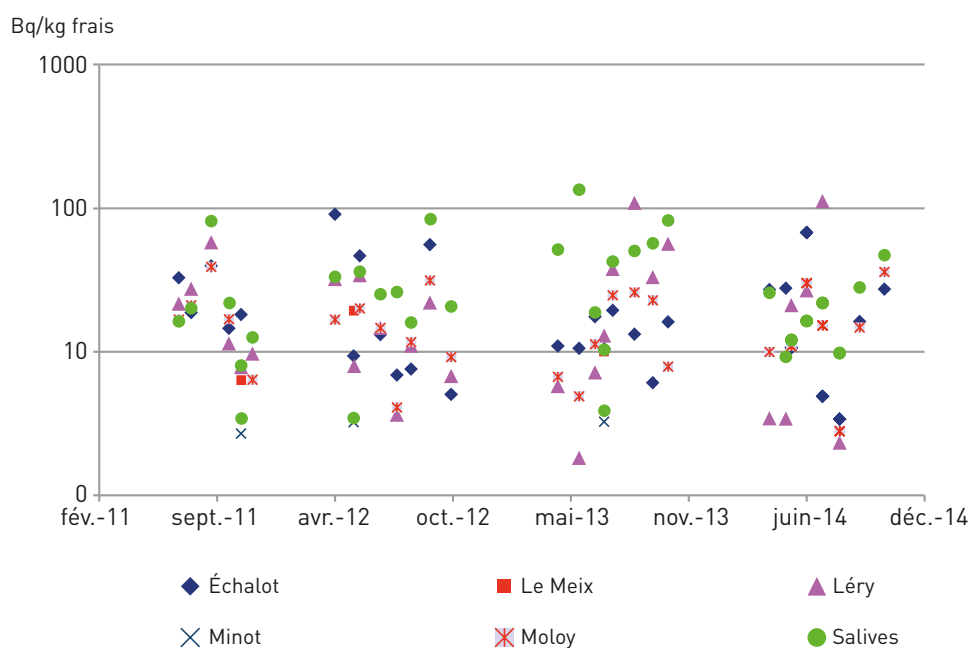
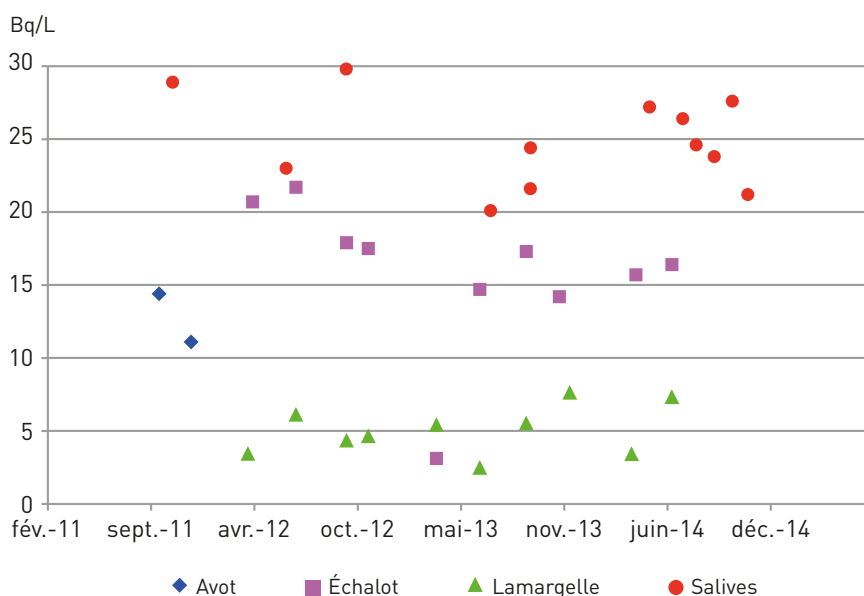


FIGURE 8 / ACTIVITÉS DU TRITIUM LIBRE MESURÉES DANS LE LAIT DE VACHE (Bq/L)



Évaluation de la dose efficace moyenne à partir des mesures environnementales

Pour estimer la dose efficace à partir des concentrations mesurées dans les différents compartiments, les voies d'exposition considérées sont : l'ingestion de denrées et d'eau, l'inhalation, l'incorporation transcutanée. La dose efficace est évaluée pour l'adulte.

Concernant l'ingestion, on considère une ration moyenne (quantités et autoconsommation moyennes de produits locaux ; cf. tableau 4) avec des aliments ayant un niveau moyen de contamination en tritium ; concernant le poisson, on considère qu'il est à l'équilibre avec l'eau de surface (la pêche est pratiquée dans les environs).

Pour l'exposition par inhalation et par voie transcutanée, la dose égale à 0,11 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ est évaluée pour un individu séjournant aux alentours du site 100 % de son temps et la valeur de concentration

dans l'air est la moyenne des quatre stations (valeurs inférieures aux seuils de décision incluses, soit 0,5 Bq/m^3 de vapeur d'eau HTO et 0,2 Bq/m^3 d'hydrogène HT).

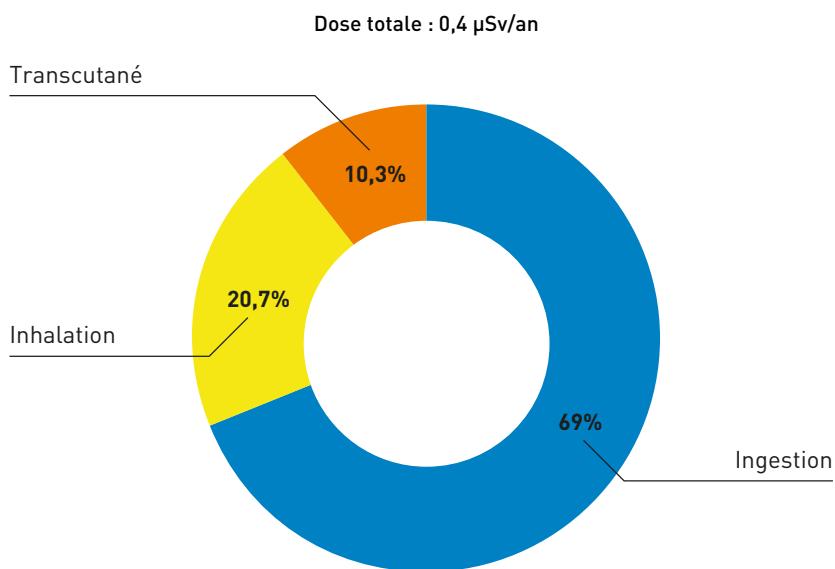
La dose par ingestion est de 0,28 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ imputable majoritairement à l'eau de boisson (72 %) et aux légumes et fruits (27 %), (cf. figure 9).

La dose totale obtenue d'une valeur de 0,39 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ est proche de celles résultant des évaluations effectuées par le CEA par calculs à partir des rejets réels : entre 0,6 et 0,8 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Pour les autres radionucléides, l'influence du centre de Valduc n'est pas observable dans l'environnement. D'après les évaluations faites par le CEA, la dose qui leur serait imputable représenterait 0,3 % de la dose totale. La dose calculée sur la base des mesures de tritium représenterait donc 99,7 % de la dose potentiellement reçue par la population résidant à proximité du site de Valduc.

2. Calcul basé sur la modélisation de la dispersion des rejets et des transferts dans les composantes de l'environnement (et non sur la prise en compte des résultats de mesure) ; résultats présentés dans le compte-rendu de la commission environnement de la SEIVA du mercredi 4 avril 2012, en accès libre sur le site internet de la SEIVA.

FIGURE 9 / ESTIMATION, À PARTIR DES MESURES DE LA SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE, DES DOSES LIÉES AUX REJETS ATMOSPHERIQUES DE TRITIUM : CONTRIBUTION DES VOIES D'ATTEINTE À LA DOSE EFFICACE TOTALE ET CONTRIBUTION DES DENRÉES À LA DOSE PAR INGESTION

Contribution des voies d'atteinte à la dose efficace totale (0,40 µSv/an).



Contribution des denrées à la dose efficace par ingestion (0,28 µSv/an).

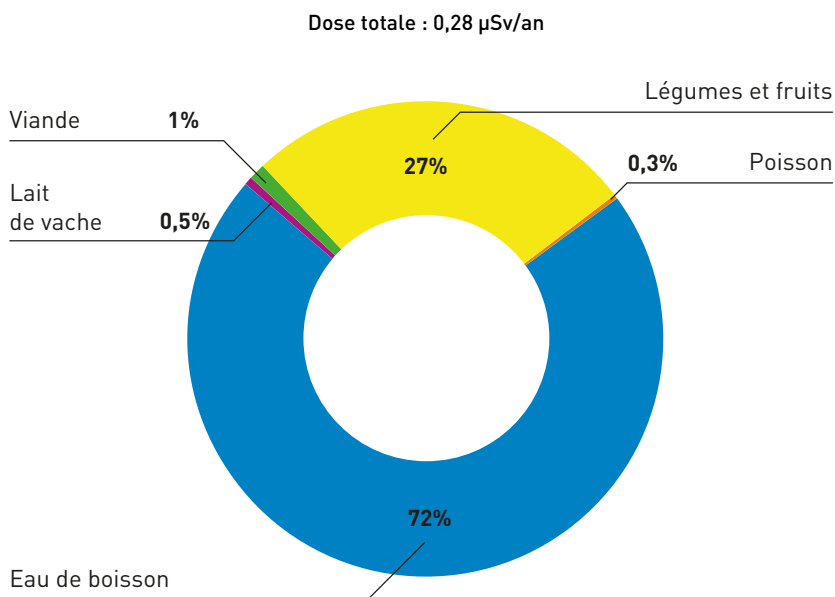


TABLEAU 4 / PARAMÈTRES DU CALCUL DE DOSE PAR INGESTION SUR LE SITE DE VALDUC

La ration est issue d'une enquête alimentaire menée par l'IRSN en 2013 autour du site de Bure en Meuse / Haute-Marne.

Denrées	Ration (autoconsommée) kg/an	Tritium (Bq/kg frais ou Bq/L)
Légumes + fruits	138	25
Lait	13	15
Viandes	27	1
Poissons	1,3 ³	29
Eau de boisson	730	15

Conclusion

Au vu des résultats acquis de mi-2011 à mi-2014 et comme les années précédentes, le tritium est le seul radionucléide qui témoigne des rejets du Centre de Valduc. Les autres résultats de mesure (gamma ambiant, indices alpha et bêta global, résultats de spectrométrie gamma) n'indiquent aucune influence du site. La contamination par les rejets d'effluents tritiés est avérée dans tous

les compartiments, avec des niveaux de tritium 10 à 100 fois supérieurs au bruit de fond radiologique (cf. chapitre 2). La dose efficace liée au tritium susceptible d'être reçue par un adulte vivant à proximité du site et estimée à partir des mesures faites dans le cadre de la surveillance du site, de l'ordre de 0,4 µSv/an, est proche de celle évaluée par le CEA par calcul sur la base des rejets réels.

3. Données issues de deux études (Étude nationale d'imprégnation aux polychlorobiphényles des consommateurs de poissons d'eau douce de l'InVS-ANSES et Bénéfices - risques liés à la consommation de poissons de l'AFSSA).

Le site de Cadarache

Cadarache est l'un des dix centres de recherche du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. Implanté sur la commune de Saint-Paul-Lez-Durance dans les Bouches-du-Rhône, le centre de Cadarache (cf. figure 1), créé le 14 octobre 1959, est situé aux confins de trois autres départements (Alpes-de-Haute-Provence, Var et Vaucluse).

Le Centre de Cadarache dispose de réacteurs de recherche, de laboratoires de fabrication et d'études des combustibles expérimentaux et

d'installations pour le développement des technologies nucléaires associées.

Le site de Cadarache regroupe :

- 18 installations nucléaires de base (INB) dont il est l'opérateur ;
- 2 installations nucléaires de base (INB) dont l'opérateur technique est AREVA-NC ;
- 1 installation nucléaire de base secrète (INBS) dédiée à la propulsion navale, dont l'exploitant technique opérationnel est AREVA-TA ;
- 34 installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) hors INB dont 26 « à caractère nucléaire ».

FIGURE 1 / LE SITE DE CADARACHE



© DR

Les rejets radioactifs

Outre les gaz rares (krypton...) rejetés par certaines INB du centre (Cabri, Leca-Star, Phébus), le principal radionucléide rejeté par voie atmosphérique par les installations nucléaires de Cadarache est le tritium (cf. figure 2). Le carbone 14 est également présent dans les rejets gazeux de l'INB n° 55 Leca-Star (de l'ordre de 0,6 GBq pour l'année 2013).

Après des contrôles radiologiques au niveau de chaque installation, les effluents radioactifs liquides du centre sont transférés depuis 2014 vers l'Atelier de Gestion Avancée et de Traitement

des Effluents destiné au traitement des effluents liquides radioactifs (AGATE). Cette installation permet de réduire le volume des déchets en concentrant la radioactivité. Les concentrats sont ensuite acheminés vers le centre de Marcoule pour le traitement final et le conditionnement en colis de déchets.

Les effluents liquides respectant les normes de transfert rejoignent le réseau des effluents industriels pour être traités dans la station d'épuration (STEP-EI). Après traitement, ces effluents sont rejetés dans la Durance (cf. tableau 1). Le tritium est le principal radionucléide rejeté par voie liquide.

FIGURE 2 / ÉVOLUTION DES REJETS GAZEUX ET LIQUIDES EN TRITIUM DU CENTRE CEA DE CADARACHE DEPUIS 2004 (GBq/an)

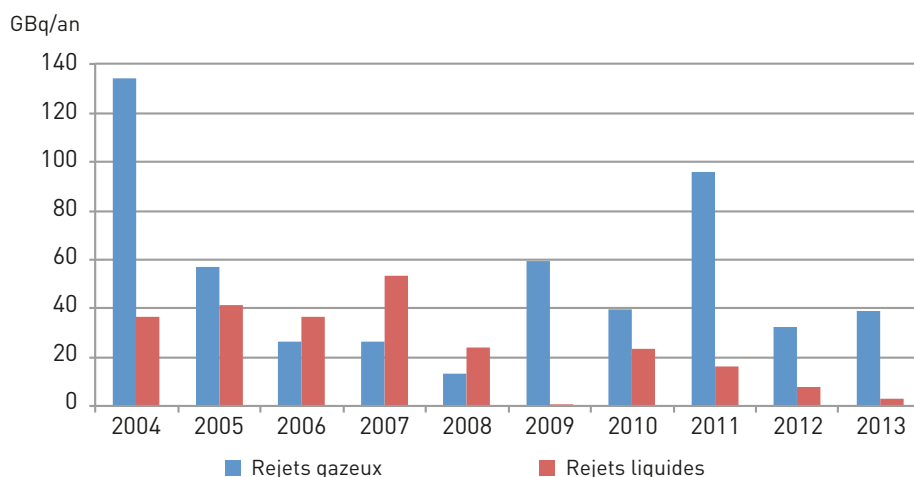


TABLEAU 1 / BILAN DES EFFLUENTS RADIOACTIFS LIQUIDES REJETÉS DANS LA DURANCE ENTRE 2009 ET 2013 - SOURCE CEA (GBq/an)

Paramètres	Tritium	Carbone 14	Mesure bêta globale	Mesure alpha globale
Activité rejetée en 2009	0,6	0,006	0,26	0,000202
Activité rejetée en 2010	23,64	0,008	0,18	0,000208
Activité rejetée en 2011	16,4	0,0103	0,201	0,000446
Activité rejetée en 2012	8,1	0,00458	0,28	0,000185
Activité rejetée en 2013	2,79	0,00219	0,29	0,000195
Activité rejetée en 2014	0,44	0,0019	0,32	0,00018

La surveillance radiologique de l'environnement du site

Pour le compartiment atmosphérique, la surveillance de la radioactivité de l'environnement réalisée par l'exploitant est assurée par des mesures en continu (rayonnement gamma ambiant) ou en différé (poussières atmosphériques, tritium, carbone 14, eau de pluie) via cinq stations réparties à l'intérieur et à l'extérieur du périmètre du centre : Grande Bastide, Verrerie, Cabri, Ginasservis et Saint-Paul-Lez-Durance.

Dans le milieu terrestre, des prélèvements mensuels de lait et de végétaux sont réalisés sous les vents dominants. Une campagne annuelle de prélèvements sur les principales productions agricoles et sur la couche superficielle des terres est également réalisée. Les prélèvements terrestres font généralement l'objet d'une mesure d'activité bêta globale et d'une spectrométrie gamma. Ces analyses sont complétées annuellement par la

mesure du tritium, du carbone 14, du strontium 90 et par une spectrométrie alpha permettant notamment la mesure des transuraniens.

Concernant le compartiment aquatique, des prélèvements continus et ponctuels d'eau de surface sont effectués dans la Durance en amont (station de pompage du centre) et en aval (station du Pont Mirabeau) du centre de Cadarache. Des prélèvements sont également effectués au niveau de l'émissaire de la canalisation des rejets et au lieu-dit « Saint-Eucher ». Les prélèvements d'eau font l'objet de mesures d'activité alpha et bêta globales et de tritium, complétées ponctuellement (notamment en aval) par des mesures du strontium 90, de spectrométrie gamma et de spectrométrie alpha. Des prélèvements de sédiments, de végétaux aquatiques et de poissons dans la Durance, sont réalisés à raison d'une campagne au moins par an. Les mesures réalisées sur la faune et la flore aquatiques sont comparables à celles effectuées dans le compartiment terrestre.

Un contrôle des eaux souterraines sous-jacentes aux installations est réalisé mensuellement par des prélèvements effectués à partir de 48 piézomètres. Sur ces prélèvements, sont déterminées les activités alpha et bêta globales et celles du tritium. Certains points font en outre l'objet d'une détermination semestrielle de l'activité du strontium 90 et des actinides (spectrométrie alpha).

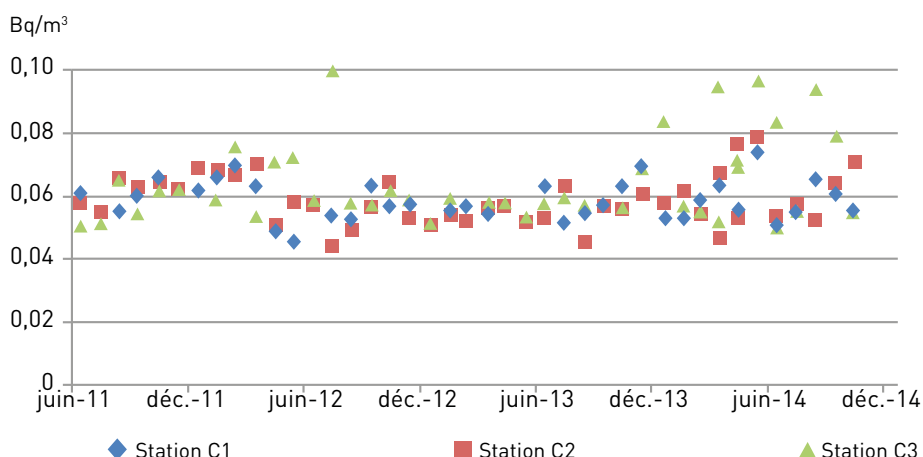
Influence du site de Cadarache sur l'environnement

Bien que prépondérant dans les rejets gazeux, le tritium atmosphérique (sous forme HT et HTO) n'a été détecté que 10 fois entre juillet 2011

et décembre 2014 avec des valeurs souvent proches des seuils de décision (entre 0,08 et 0,4 Bq/m³). Ces résultats, supérieurs au bruit de fond radiologique qui est d'environ 0,01 Bq/m³ (cf. chapitre 2), sont imputables aux rejets du site CEA de Cadarache.

Comme pour le tritium atmosphérique, le carbone 14 est prélevé à l'aide de barboteurs (3 stations). Les résultats obtenus qui oscillent autour d'une valeur moyenne de 0,06 Bq/m³ avec des valeurs maximales proches de 0,1 Bq/m³ légèrement supérieures au bruit de fond radiologique français (de l'ordre de 0,04 Bq/m³), témoignent donc d'une influence des rejets de carbone 14 du site de Cadarache (cf. figure 3).

FIGURE 3 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU CARBONE 14 DANS L'AIR À PROXIMITÉ DU SITE DE CADARACHE ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 - BARBOTEURS DES STATIONS ATMOSPHÉRIQUES DE GINASSERVIS (C1), VERRERIE (C2) ET SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE (C3) (Bq/m³)



Le tritium est également mesuré très sporadiquement dans les eaux de pluie collectées à proximité du site. L'activité maximale a été de 3,5 Bq/L avec des activités moyennes très proches du bruit de fond (entre 1 et 3 Bq/L).

L'analyse des échantillons d'eau de surface montre que le site CEA n'influe que très rarement sur l'activité des radionucléides qui y sont mesurés. La grande majorité des résultats sont inférieurs aux seuils de décision. Les quelques activités en tritium mesurées dans la Durance et le canal sont comprises entre 2 Bq/L et 10 Bq/L (cf. figure 4), avec des résultats sensiblement plus élevés en aval du site qu'en amont.

Les prélèvements réalisés dans la nappe phréatique via le réseau de piézomètres du centre,

montrent, pour certains points de surveillance, un marquage au tritium à des valeurs comprises entre les seuils de décision et 350 Bq/L au point « SD5 » (cf. figure 5). Ce point présente également des valeurs élevées en activité bêta globale (entre 4 et 250 Bq/L de juillet 2011 à décembre 2014). Cette contamination à proximité immédiate de l'INB 56, résulte de défauts d'étanchéité de certaines fosses dans lesquelles sont entreposées depuis le début des années 60 des déchets solides radioactifs issus du fonctionnement et du démantèlement des installations nucléaires du CEA. Afin d'assurer une gestion sûre et durable des déchets entreposés dans l'INB n° 56 et en particulier de procéder à leur reprise, leur caractérisation et à leur conditionnement, un ensemble de prescriptions a été publié dans la Décision

n° 2013-DC-0369 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 5 septembre 2013.

En ce qui concerne le compartiment terrestre et les denrées, les résultats associés aux prélèvements de lait de vache, d'épinards et de thym

effectués à proximité du centre de Cadarache par le CEA et l'IRSN relèvent soit de la radioactivité naturelle (^{40}K , ^7Be ...), soit de la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl ou de celles des essais d'armes nucléaires (^{137}Cs ...).

FIGURE 4 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS LA DURANCE ET LE CANAL EDF EN AMONT ET EN AVAL DU CEA DE CADARACHE ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/L)

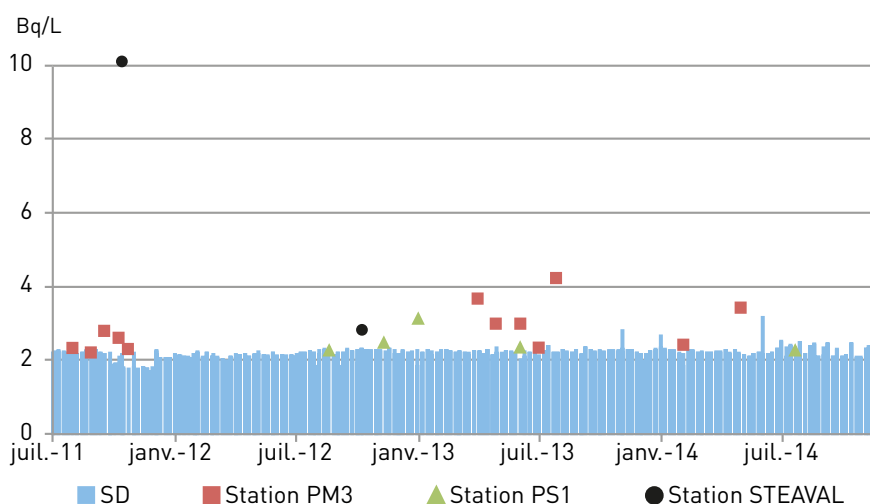
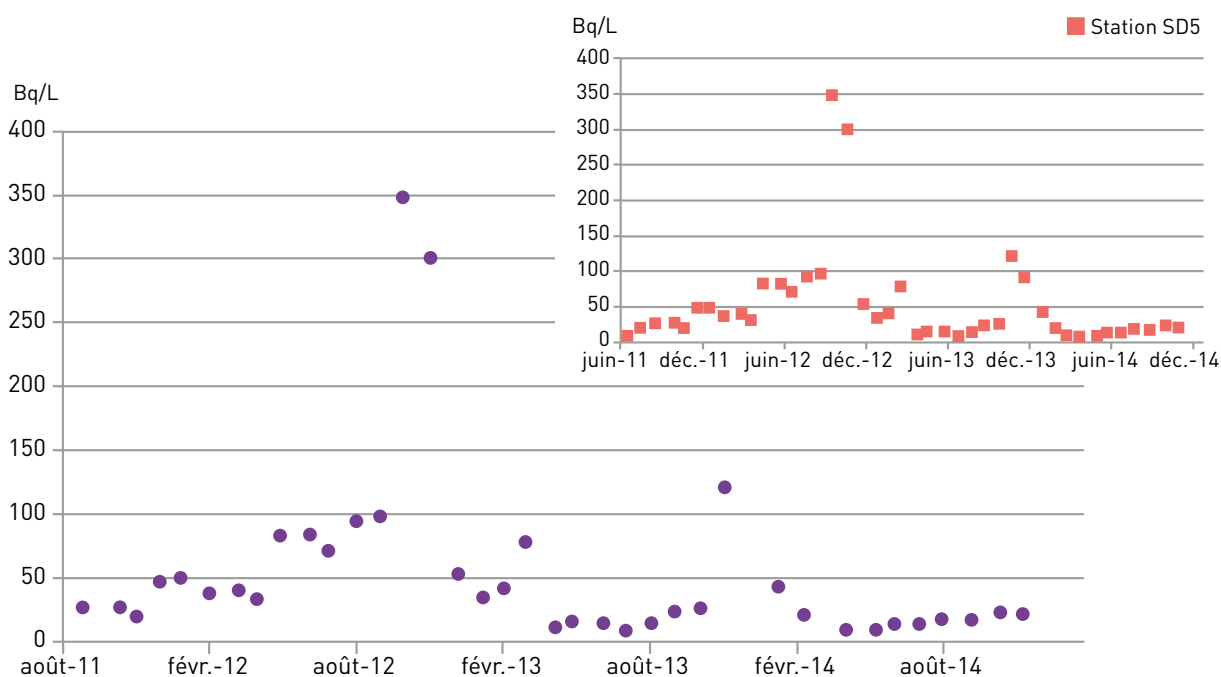


FIGURE 5 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM MESURÉES DANS LES EAUX SOUTERRAINES DU CEA DE CADARACHE ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 – TOUS PIÉZOMÈTRES CONFONDUS (À GAUCHE) ET ENCADRÉ SUR LE PIÉZOMÈTRE SD5 (À DROITE) (Bq/L)



Le site de Grenoble

Les centres de recherche du CEA et de l'Institut Laue-Langevin (ILL) sont situés à proximité immédiate l'un de l'autre et insérés dans l'agglomération grenobloise (Isère ; cf. figure 1). Ces sites occupent l'entrée de la cluse de l'Isère séparant les massifs du Vercors et de la Chartreuse.

L'Institut Laue-Langevin (ILL) est un organisme de recherche international en sciences et techniques neutroniques fondé en 1967 par la France et l'Allemagne (puis rejoint en 1973 par la Grande-Bretagne). L'Institut est doté d'une source de neutrons très

intense, le réacteur nucléaire à Haut Flux qui constitue l'Installation Nucléaire de Base n°67. Il dispose également de 40 spectromètres de haute technologie donnant des informations sur la structure et la dynamique de la matière (solides, liquides, gaz...) et couvrant de nombreux champs d'investigation : physique des particules, physique nucléaire, chimie, biosciences, sciences des matériaux...

Les travaux de déconstruction des installations du CEA de Grenoble sont aujourd'hui terminés. L'arrêt de déclassement de la dernière installation nucléaire est attendu pour 2017.

FIGURE 1 / LE SITE DE GRENOBLE



© DR

Les rejets radioactifs

Le contrôle des effluents radioactifs gazeux de l'ILL est assurée au niveau de 2 émissaires, en aval des systèmes de filtration des effluents. Les rejets gazeux sont classés en 5 catégories de radionucléides (gaz rares, tritium, carbone 14, iodes et aérosols). Les rejets en gaz sont quantifiés par la voie de mesure des gaz temps réel et par un prélèvement représentatif hebdomadaire mesuré en laboratoire pour établir le spectre des radioéléments gazeux.

Le tritium est le radionucléide le plus abondant dans les rejets gazeux de l'ILL (figure 2), suivi par les gaz rares (principalement l'argon 41) et le carbone 14 avec des activités rejetées 10 fois plus faibles. En ce qui concerne les rejets d'halogènes et d'aérosols, les activités rejetées sont rarement supérieures aux limites de détection qui sont de l'ordre de quelques millièmes de l'autorisation de rejet.

Les rejets gazeux du centre CEA de Grenoble (principalement du tritium – cf. tableau 1) ont cessé en

juillet 2013 avec l'arrêt définitif de la ventilation, consécutive à la fin de l'assainissement de l'INB 61-Lama.

L'émissaire par lequel sont effectués et contrôlés les rejets liquides de l'ILL dans l'Isère est situé à 1 km en amont de son confluent avec le Drac. Il s'agit d'une canalisation dont l'extrémité est placée dans le lit de l'Isère. Avant rejet dans la canalisation menant au point de rejet, les effluents liquides sont stockés dans des cuves internes à l'installation. Ils y sont caractérisés sur la base d'un prélèvement représentatif effectué après brassage de la cuve. Le radionucléide le plus abondant dans les rejets liquides est le tritium dont les activités sont environ 1000 fois plus importantes que celles du carbone 14 en 2013 et 2000 fois supérieures à celles dues aux rejets d'émetteurs bêta / gamma (cf. tableau 2).

En ce qui concerne le CEA de Grenoble, il n'y a plus d'effluents liquides radioactifs provenant des INB du centre depuis fin 2012.

FIGURE 2 / ÉVOLUTION DES REJETS GAZEUX (GAZ RARES, TRITIUM ET CARBONE 14) DE L'ILL DEPUIS 2008

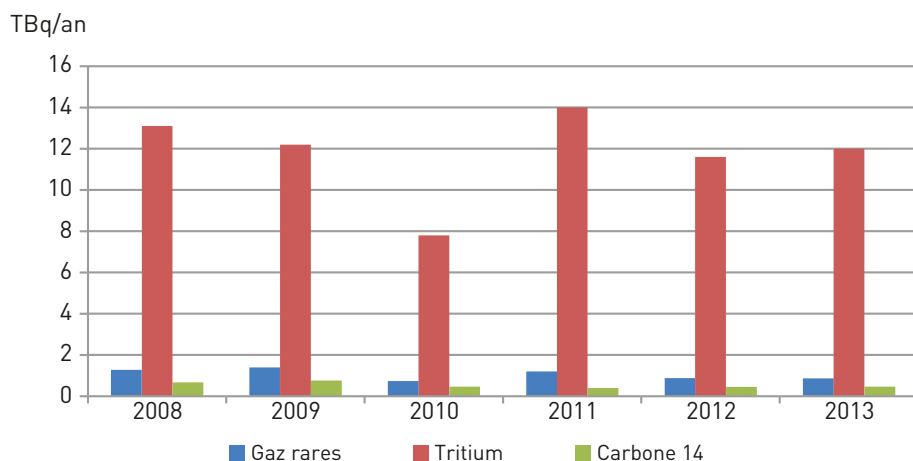


TABLEAU 1 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ TOTALE EN TRITIUM DANS LES REJETS GAZEUX DU CEA DEPUIS 2009 (GBq)

Année	Tritium
2009	2
2010	1
2011	0,26
2012	0,27
2013	0,09

TABLEAU 2 / ÉVOLUTION DES REJETS LIQUIDES (TRITIUM, CARBONE 14 ET ÉMETTEURS BÊTA / GAMMA) DE L'ILL DEPUIS 2008 (GBq)

Année	Tritium	Carbone 14	Emetteurs bêta/ gamma
2008	220	0,23	0,0975
2009	30	0,11	0,094
2010	240	0,21	0,096
2011	120	0,27	0,13
2012	370	0,27	0,11
2013	240	0,24	0,11

La surveillance radiologique de l'environnement du site

Depuis fin 2013, les INB du site CEA de Grenoble n'ont plus d'impact potentiel sur l'environnement. Il ne reste donc, en activité nucléaire conséquente sur le polygone scientifique, que le réacteur de recherche de l'ILL. Dans cette perspective, la surveillance de l'environnement, commune à ces deux sites, a été placée sous la responsabilité de l'Institut Laue Langevin depuis le 4 janvier 2010.

Deux types de surveillance sont assurés par l'ILL :

- Une surveillance en continu, au moyen de stations situées en différents points de l'agglomération. Deux au nord : au pied du pylône météo à la pointe de la presqu'île, et plus loin vers le nord-ouest, à la Rollandière, et deux au sud : sur le toit de la piscine Chorier-Berriat, et au Mûrier, au-dessus de St-Martin-d'Hères.
- Une surveillance en différé, sur la base des échantillons prélevés régulièrement puis analysés en laboratoire. La fréquence de ces prélèvements est fixée réglementairement.

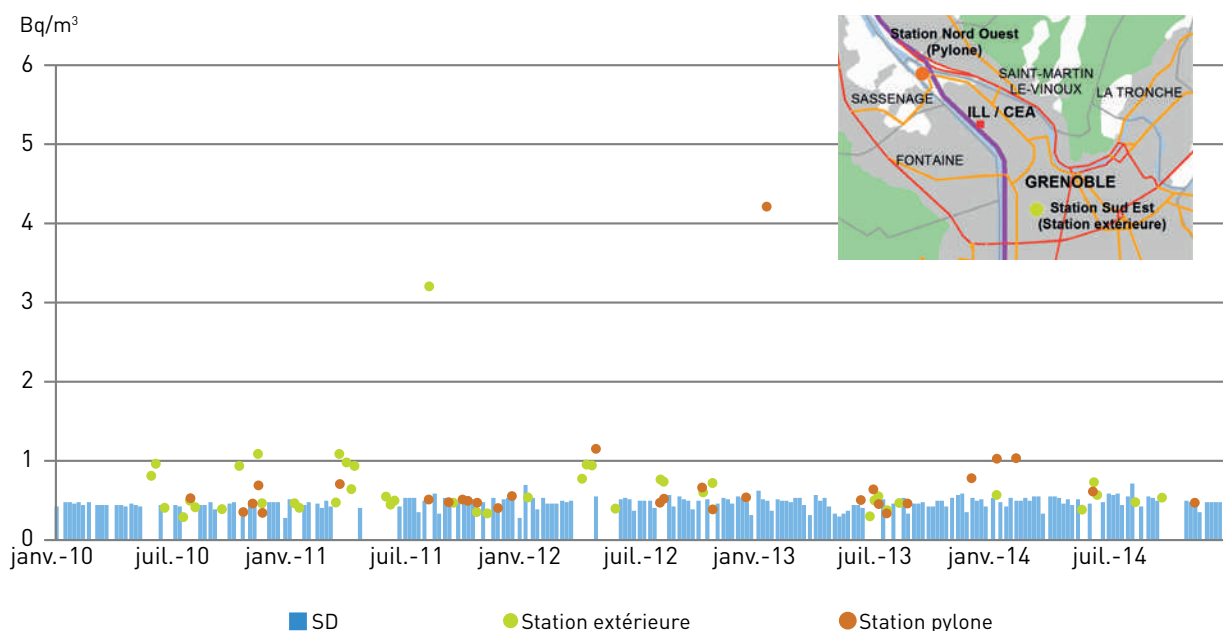
L'ILL réalise environ 2000 prélèvements d'échantillons par an (aérosols, gaz, eaux de pluie, eaux

de nappes phréatiques, eaux de rivières (Drac et Isère), denrées et bio-indicateurs terrestres (lait, herbe, productions agricoles) et aquatiques (poissons, roseaux), sols et sédiments. Ces prélèvements donnent lieu à 5500 analyses par an. L'objectif est de s'assurer de l'absence d'impact radiologique sur l'environnement et la chaîne alimentaire dans la cuvette grenobloise.

Influence du site (ILL essentiellement) de Grenoble sur l'environnement

En cohérence avec sa nette prédominance dans les rejets, le tritium est le seul radionucléide pour lequel l'influence du site est visible dans l'environnement. Dans le compartiment atmosphérique, les barboteurs implantés au sud-est et à la confluence du Drac et de l'Isère au nord-ouest (station du pylône météo), sous les vents dominants, permettent de détecter des activités maximales de l'ordre de 1 Bq/m³ avec un pic supérieur à 4 Bq/m³ début 2013. Ces résultats (cf. figure 3), nettement supérieurs au bruit de fond radiologique (environ 0,01 Bq/m³), sont donc imputables aux rejets de l'ILL de Grenoble.

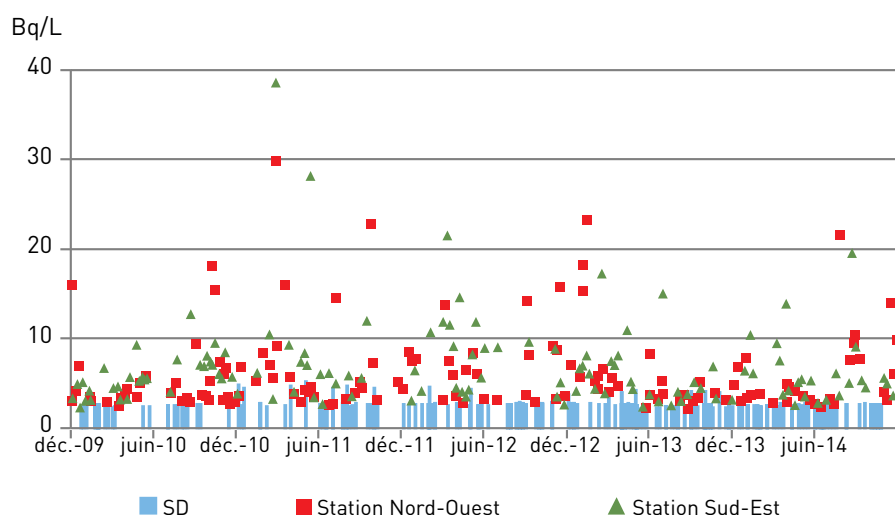
FIGURE 3 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'AIR À PROXIMITÉ DU CENTRE ILL – CEA DE GRENOBLE ENTRE JANVIER 2010 ET DÉCEMBRE 2014 – DONNÉES ILL (Bq/m³)



Le tritium est également régulièrement mesuré dans les eaux de pluie collectées à proximité du site de l'ILL (cf. figure 4) où les conditions atmosphériques sont fortement influencées par

la cluse de l'Isère. L'activité maximale détectée entre 2011 et 2014 est de 23,19 Bq/L avec des activités moyennes oscillant entre le bruit de fond (1 à 3 Bq/L) et 10 Bq/L.

FIGURE 4 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE À PROXIMITÉ DU CENTRE ILL – CEA DE GRENOBLE ENTRE JANVIER 2010 ET DÉCEMBRE 2014 – DONNÉES ILL ET IRSN (Bq/L)



L'analyse des données de la surveillance radiologique montre que l'ILL n'influe pas de manière visible sur l'activité des radionucléides mesurés dans l'Isère ou le Drac. La grande majorité des résultats est inférieure aux seuils de décision. Les quelques activités en tritium mesurées en amont et en aval de l'installation sont sensiblement équivalentes et comprises entre 2,5 et 4 Bq/L (cf. figure 5), avec une valeur maximale de 4,8 Bq/L mesurée au début du mois de décembre 2014.

L'ILL est implanté sur la plaine alluviale de Grenoble et les nappes phréatiques sont situées généralement à faible profondeur.

La radioactivité de la nappe est surveillée via plusieurs piézomètres dont le marquage moyen en tritium est de l'ordre de 2,5 Bq/L, avec une valeur maximale mesurée en janvier 2014 de 10,3 Bq/L (cf. figure 6). Ces valeurs sont à mettre en relation avec celles mesurées dans l'Isère, qui sont du même ordre de grandeur.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'ISÈRE ET LE DRAC EN AMONT ET EN AVAL CENTRE ILL - CEA DE GRENOBLE ENTRE JANVIER 2010 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/L)

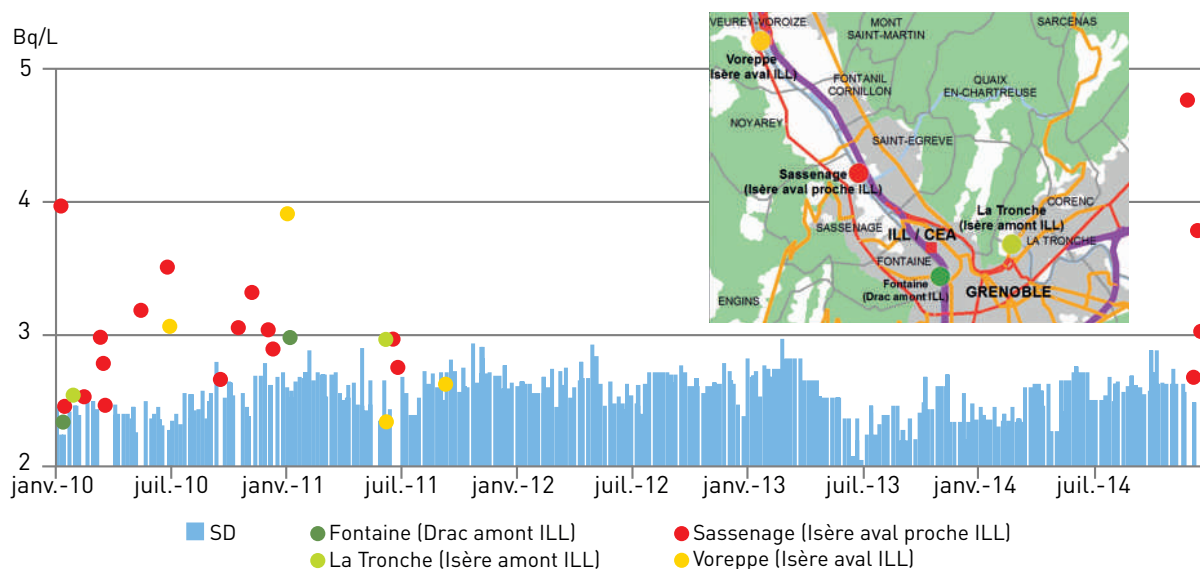
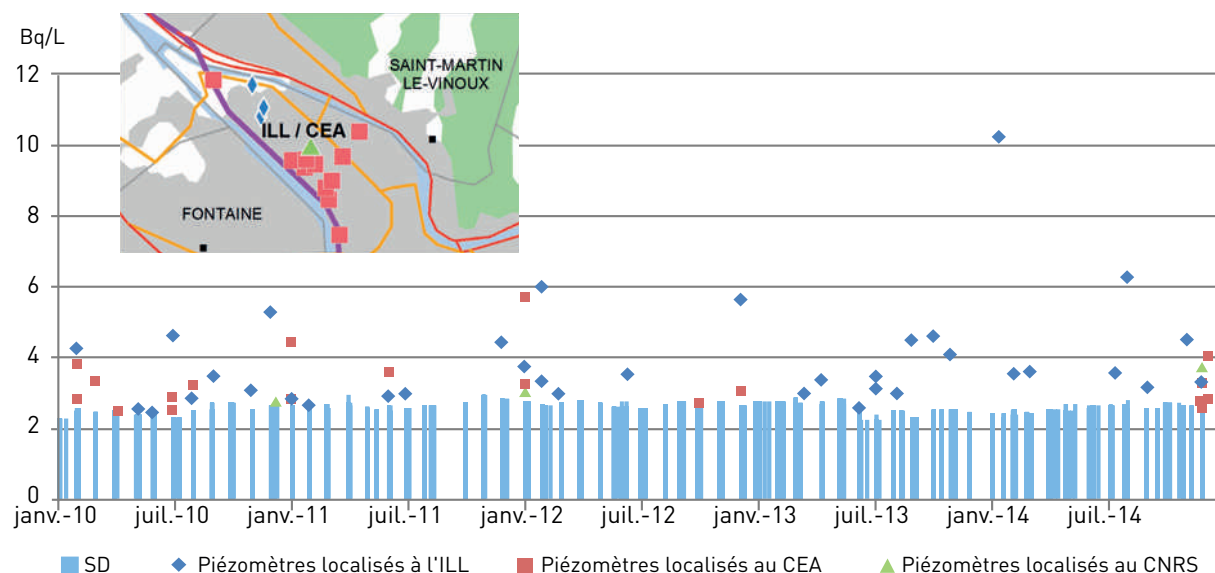


FIGURE 6 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'EAU SOUTERRAINE PRÉLEVÉE AVEC LES PIÉZOMÈTRES SITUÉS SUR LE CENTRE ILL - CEA DE GRENOBLE OU À PROXIMITÉ, ENTRE JANVIER 2010 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/L)

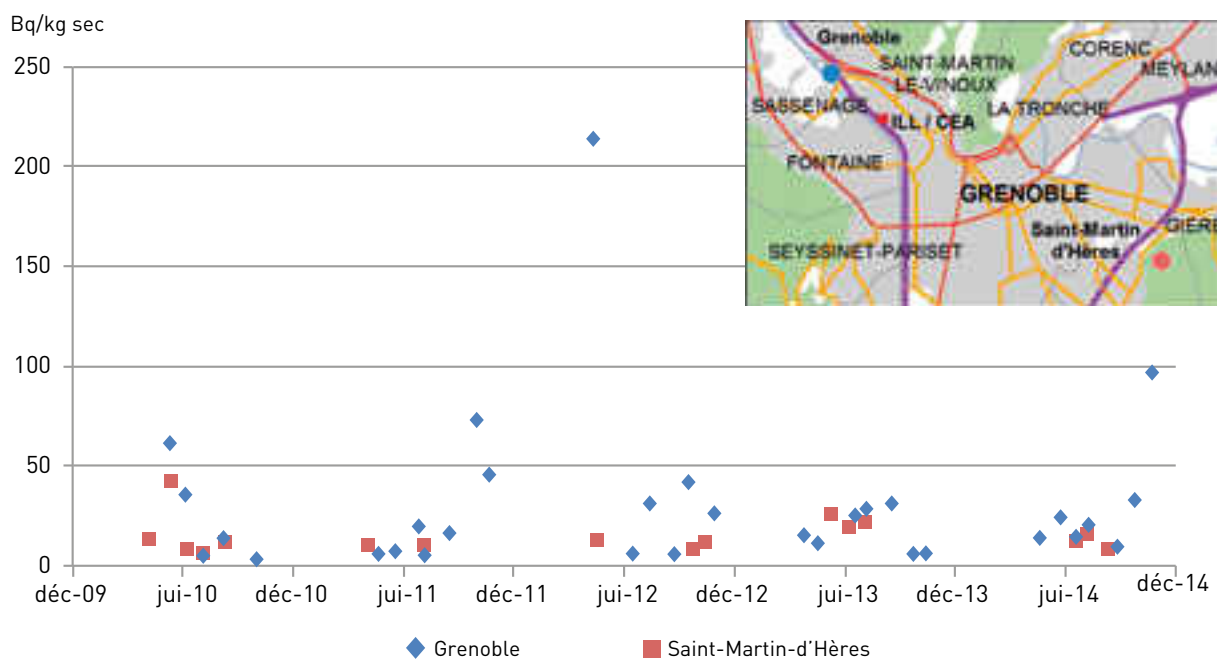


Les prélèvements d'herbe effectués mensuellement à proximité du site de Grenoble présentent un net marquage en tritium : les activités mesurées fluctuent entre 5 et 215 Bq/kg sec sur la commune de Grenoble et entre 8 et 110 Bq/kg sec sur la commune de Saint-Martin-d'Hères. Ce marquage est imputable aux rejets atmosphériques des installations de l'Institut Laue-Langevin (cf. figure 7).

Les mesures réalisées sur les autres matrices environnementales (lait, légumes, céréales) mettent également en évidence, de façon très sporadique, la présence de tritium lié, imputable aux rejets atmosphériques de l'Institut Laue-Langevin.

Les autres mesures réalisées dans l'environnement de ce site relèvent toutes soit de la radioactivité naturelle (^{40}K , ^7Be ...), soit de la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl ou de celles des essais d'armes nucléaires (^{137}Cs ...).

FIGURE 7 / ACTIVITÉS MASSIQUES DU TRITIUM LIBRE DANS L'HERBE DE PRAIRIE PRÉLEVÉE À GRENOBLE ET SAINT-MARTIN-D'HÈRES ENTRE JANVIER 2010 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/kg sec)



Évaluation dosimétrique

L'étude de l'ensemble des résultats issus de la surveillance radiologique de l'environnement montre que l'influence des rejets du site ILL / CEA de Grenoble n'est liée qu'à la présence de tritium dans l'air. L'exposition correspondante est évaluée pour un adulte séjournant aux alentours du site 100 % de son temps, et la valeur de concentration moyenne dans l'air à la station de prélèvement, est de 0,75 Bq/m³. Avec ces hypothèses, la dose par inhalation et transfert percutané serait de 0,15 µSv/an en considérant que

100 % du tritium rejeté sont sous forme HTO. Cette valeur peut être comparée à celle issue du calcul d'impact des rejets gazeux par modélisation réalisé par l'ILL : 0,14 µSv/an pour un adulte, sur la base des rejets de l'année 2013.

L'impact des rejets de l'ILL est donc extrêmement faible, le 10^{ème} de la dose correspondant à une seule journée d'exposition à l'irradiation naturelle provenant des rayonnements cosmiques et telluriques mesurée dans la cuvette grenobloise (soit 60 nSv par heure).

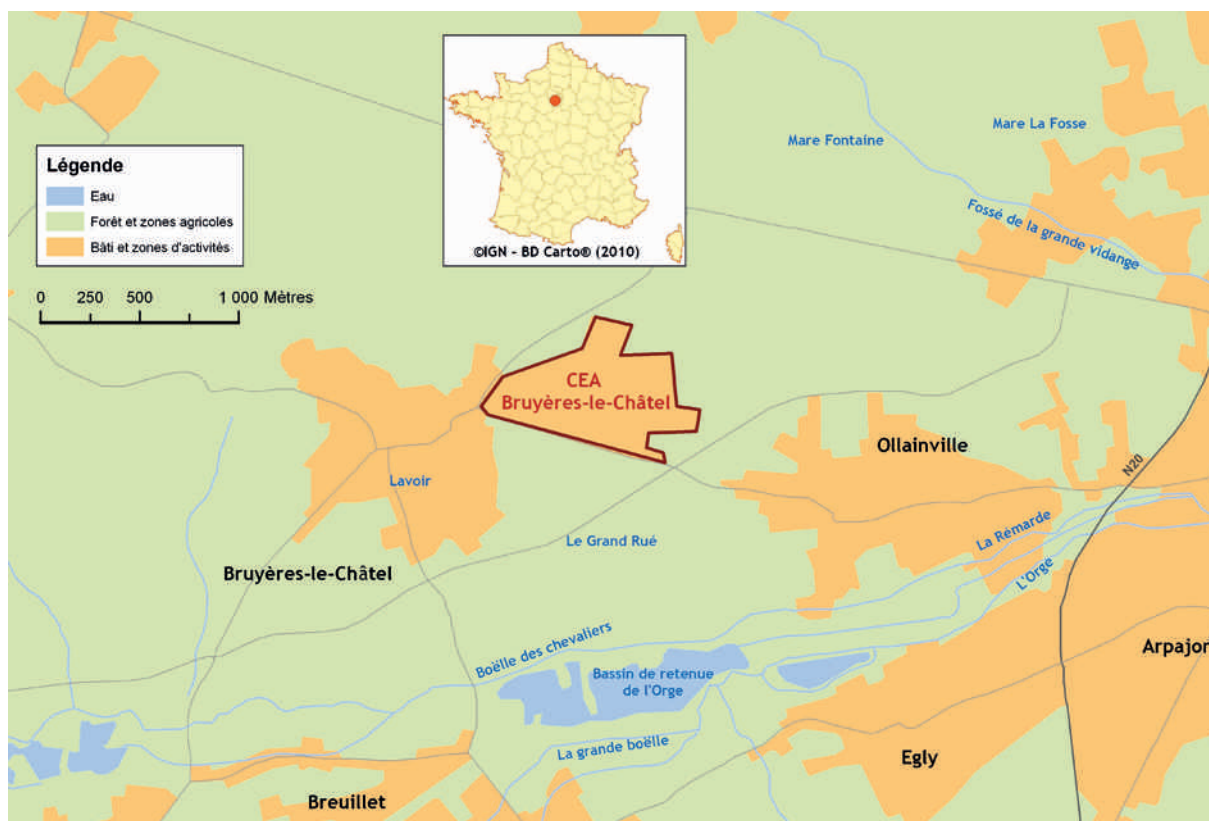
Le site de Bruyères-le-Châtel

Le site de Bruyères-le-Châtel (91) est implanté sur le bassin versant de l'Orge, affluent de la Seine par sa rive gauche (cf. figure 1). C'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, soutien des organisations internationales pour la vérification du traité d'arrêt complet des essais nucléaires et 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 se poursuivent.

FIGURE 1 / LOCALISATION DU SITE DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL



Les rejets radioactifs

Le tritium est le seul radionucléide autorisé dans les rejets gazeux de ce centre. Les activités rejetées annuellement sont liées aux opérations de démantèlement ; elles diminuent progressivement depuis 2003 (cf. figure 2).

Les rejets d'effluents gazeux radioactifs font l'objet de contrôles en continu au moyen de barboteurs installés sur les deux émissaires

(CH1 et CH2) de l'installation (les barboteurs sont doublés à chaque émissaire).

Les effluents industriels liquides traités et les eaux pluviales rejetés à l'émissaire rejoignent la Rémarde, milieu récepteur de l'INBS via le ru du Grand Rué. Le principal radionucléide présent dans les effluents liquides industriels rejetés dans le milieu naturel par cette INBS est également le tritium (cf. figure 3) dont l'activité annuelle rejetée a également diminué parallèlement à ce qui est observé pour les rejets gazeux depuis 2003.

FIGURE 2 / ÉVOLUTION DES REJETS GAZEUX EN TRITIUM DU CENTRE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL DEPUIS 2003 (TBq)

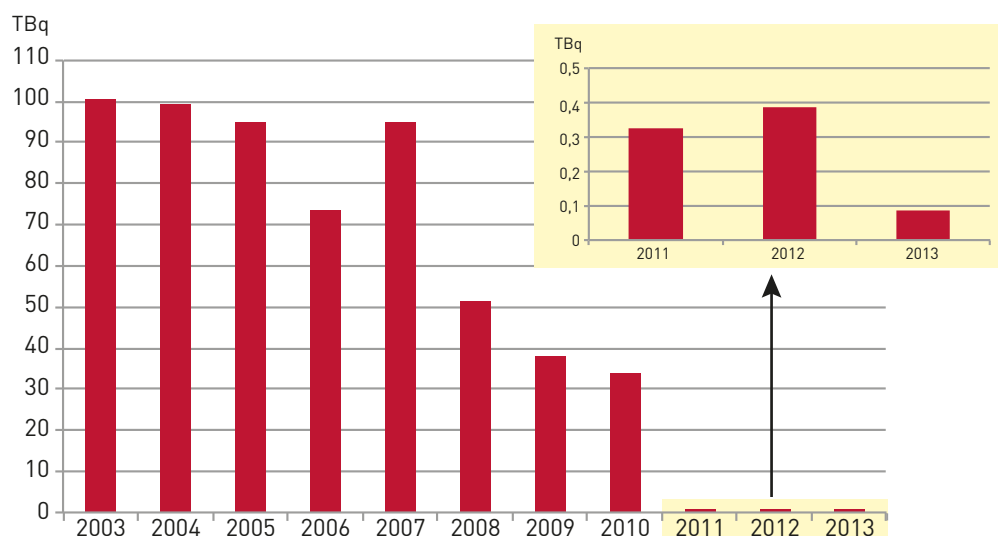
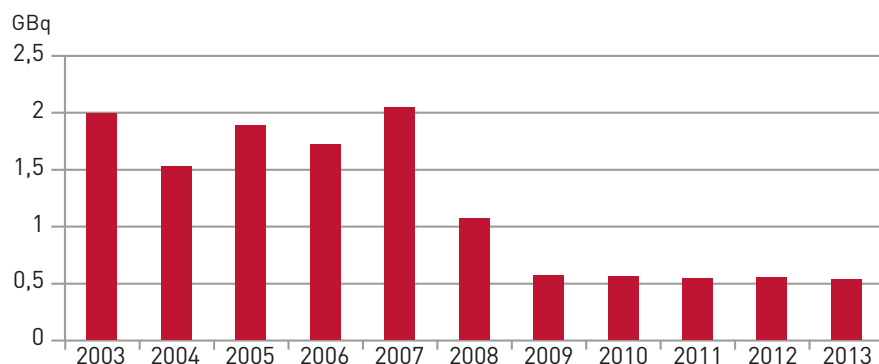


FIGURE 3 / ÉVOLUTION DES REJETS LIQUIDES EN TRITIUM DU CENTRE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL DEPUIS 2003 (GBq)



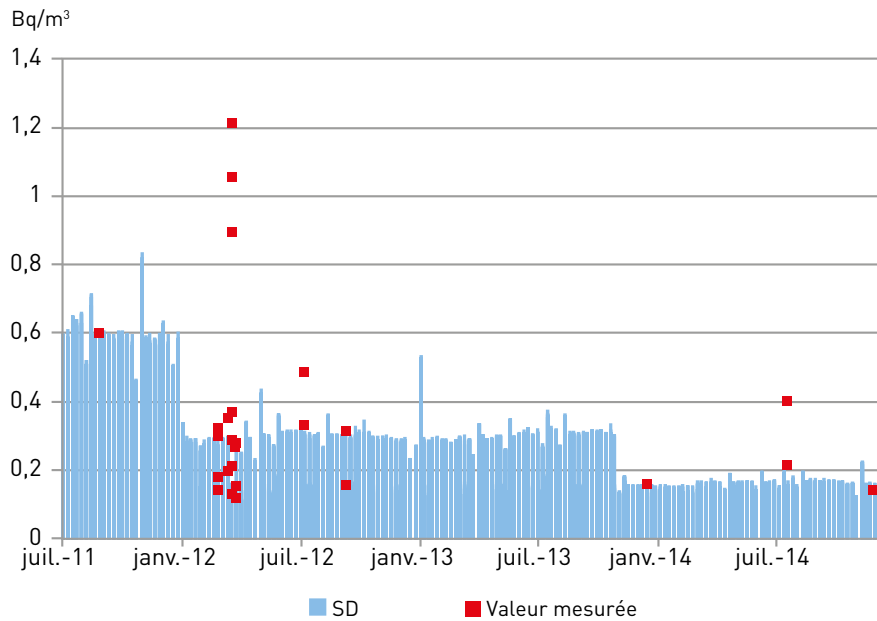
La surveillance radiologique de l'environnement du site

Conformément aux rejets autorisés du site, le tritium est le radionucléide plus particulièrement recherché dans les compartiments atmosphérique et terrestre *via* des prélèvements de poussières atmosphériques, d'eau de pluie, de végétaux et de denrées. Dans le milieu aquatique, les eaux de surface, les sédiments, la faune et la flore font l'objet de prélèvements en amont et en aval de la confluence dans le Ru du Grand Rué et dans la Rémarde. Les eaux souterraines du site font également l'objet de prélèvements annuels en amont (1 point) et en aval hydrogéologique (2 points) du site, et de mesures de tritium.

Influence du site de Bruyères-le-Châtel sur l'environnement

Le tritium est donc le radionucléide pour lequel l'influence du site est la plus visible dans le compartiment atmosphérique. Les barboteurs implantés aux 4 points cardinaux du site permettent de détecter très ponctuellement des activités supérieures aux seuils de décision. Les activités maximales mesurées en 2012 sont de l'ordre de 1 Bq/m³ et de l'ordre de 0,2 Bq/m³ depuis 2013. Ces résultats (*cf.* figure 4), supérieurs au bruit de fond radiologique (0,01 Bq/m³), sont donc imputables aux rejets du site CEA de Bruyères-le-Châtel.

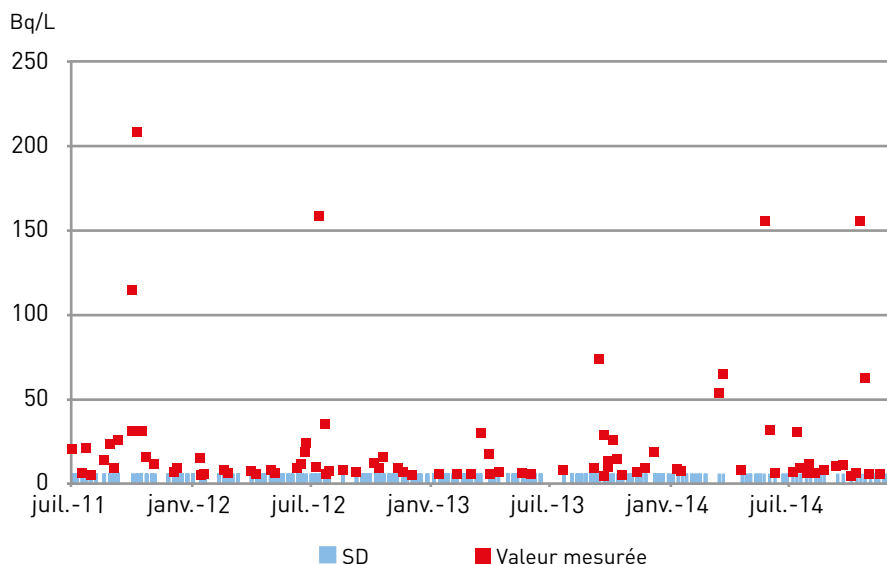
FIGURE 4 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'AIR À PROXIMITÉ DU CENTRE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 – BARBOTEURS DES STATIONS NORD, SUD, EST ET OUEST (TRITIUM TOTAL JUSQU'EN OCTOBRE 2013 PUIS TRITIUM HTO) (Bq/m³)



Le tritium est également régulièrement mesuré dans les eaux de pluie collectées à proximité du site (cf. figure 5). L'activité maximale détectée entre juillet 2011 et décembre 2014 est de 208 Bq/L avec des activités moyennes oscillant entre le bruit de fond (1 à 3 Bq/L) et 30 Bq/L.

Le CEA et l'IRSN réalisent des mesures sur les eaux du ru du Grand Rué qui reçoit les effluents industriels liquides traités et les eaux pluviales rejetés à l'émissaire. D'autres points de contrôle (étang d'Arny, bassin de Trévoix) sont également réalisés jusqu'à la Rémarde, milieu récepteur des eaux du ru du Grand Rué.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE À PROXIMITÉ DU CENTRE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/L)



La grande majorité des résultats est inférieure aux seuils de décision. Les activités en tritium mesurées dans les eaux du Grand Rué sont comprises entre le seuil de décision (environ 5 Bq/L) et 45 Bq/L (cf. figure 6). Les activités mesurées au niveau des autres stations de surveillance décroissent avec l'augmentation de la distance au site : entre 10 et 15 Bq/L à Arny, entre 5 et 10 Bq/L à Trévoix et proche de 5 Bq/L dans la Rémarde. Ces résultats, supérieurs au bruit de fond radiologique, sont donc imputables aux rejets du site de Bruyères-le-Châtel.

Les résultats associés aux prélèvements de lait de vache et d'herbe effectués mensuellement à proximité du site de Bruyères-le-Châtel sont globalement inférieurs aux seuils de décision (^{137}Cs , ^3H). Sur la période d'analyse de ce bilan (2011-2014), seuls trois prélèvements d'herbe ont donné des résultats en tritium libre supérieurs mais proches de ces seuils de décision, compris entre 4,4 et 6,3 Bq/kg frais. Ces marquages très sporadiques témoignent des rejets atmosphériques en tritium du site (cf. figures 1 et 3).

Les autres mesures réalisées dans l'environnement de ce site relèvent toutes soit de la radioactivité naturelle (^{40}K , ^7Be ...), soit de la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl ou de celles des essais d'armes nucléaires (^{137}Cs ...).

Évaluation dosimétrique

À l'image d'autres sites nucléaires en France et en cohérence avec les rejets du site, l'étude des résultats issus de la surveillance radiologique de l'environnement montre que l'influence des rejets du site de Bruyères-le-Châtel n'est liée qu'à la présence de tritium dans l'air.

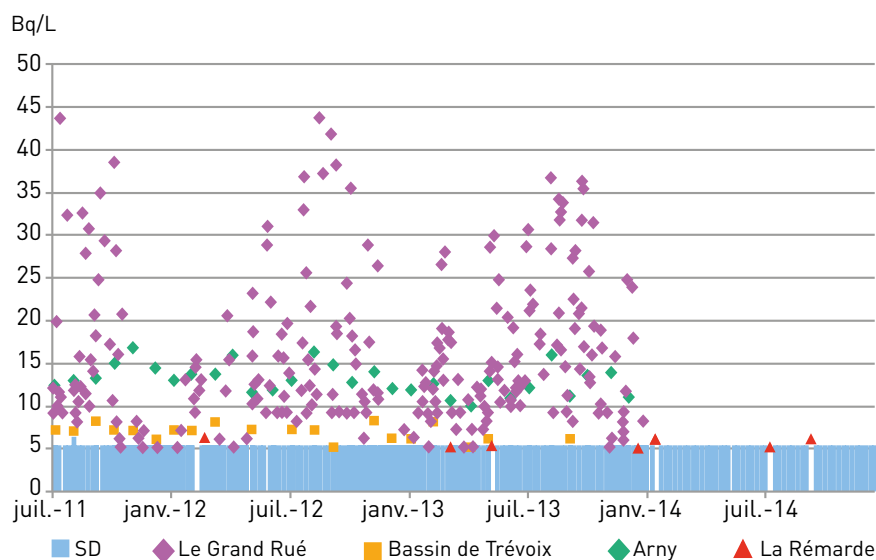
Pour l'exposition par inhalation et transcutanée, la dose est évaluée pour un adulte séjournant aux alentours du site 100 % de son temps, avec une valeur de concentration moyenne dans l'air de $0,6 \text{ Bq/m}^3$. Avec ces hypothèses, la dose par inhalation et transfert percutané serait de $0,14 \mu\text{Sv/an}$ (en considérant que 100 % du tritium rejeté sont sous forme HTO). Cette dose est inférieure au $10^{\text{ème}}$ de la dose correspondant à une seule journée d'exposition aux rayonnements naturels (cosmique et tellurique) dans l'environnement de Bruyères-le-Châtel.



© IRSN

Prélèvement d'eau de la Mare Fontaine près de Bruyères-le-Châtel

FIGURE 6 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS LES EAUX DE SURFACE PRÉLEVÉES PRÈS DU CENTRE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/L)



Le site de Saclay

Le site de Saclay est situé dans le département de l'Essonne à une vingtaine de kilomètres de Paris. Il occupe une surface de 125 ha sur lesquels sont implantées huit installations nucléaires de base. Les installations du CEA les plus importantes sont : les réacteurs Osiris (réacteur d'irradiation technologique) et Orphée (réacteur à faisceaux de neutrons), le LECl (laboratoire d'étude des combustibles irradiés) et l'irradiateur gamma Poséidon. L'entreprise CIS-Bio international (fabrication de produits utilisés en médecine nucléaire) et le laboratoire de marquage de molécules organiques sont également implantés sur le site.

Rejets et plans de surveillance

La figure 2 présente l'évolution des rejets gazeux et liquides dans la période de 2008 à 2013. À l'exception de l'iode dans les rejets gazeux, les activités rejetées annuellement sont relativement constantes dans le temps. Outre les gaz rares qui se dissipent dans l'air et qui sont sans conséquences sur les autres composantes de l'environnement, le tritium prédomine très largement tant dans les rejets gazeux que dans les rejets liquides.

Après traitement, les effluents liquides du site débouchent *via* l'aqueduc des Mineurs dans l'Étang Vieux puis par un trop-plein dans l'Étang Neuf. Celui-ci se déverse ensuite vers le ruisseau de Vauhallan, un affluent de la Bièvre (*cf.* figure 1).

Le tableau 1 présente les plans de la surveillance radiologique environnementale réalisée autour du site de Saclay par le CEA et l'IRSN.

FIGURE 1 / IMPLANTATION GÉOGRAPHIQUE DU SITE DE SACLAY

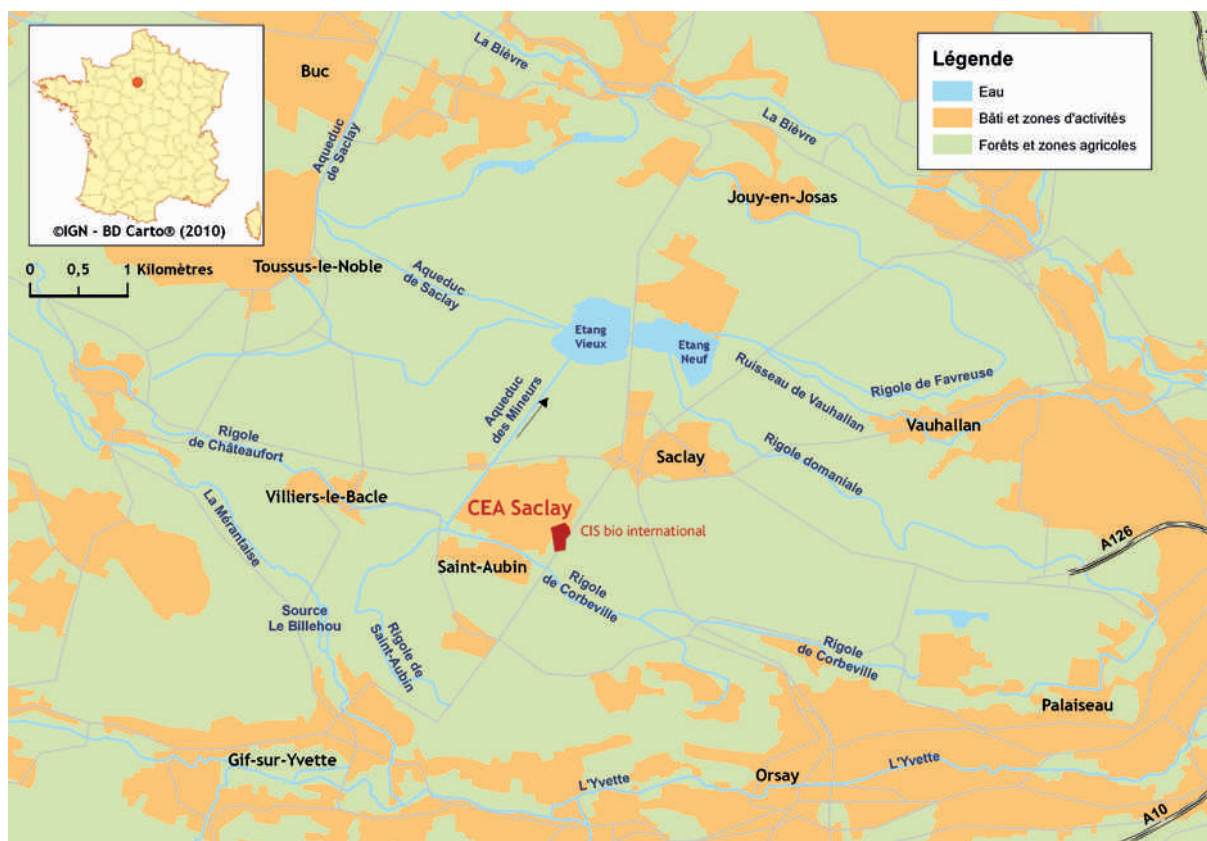
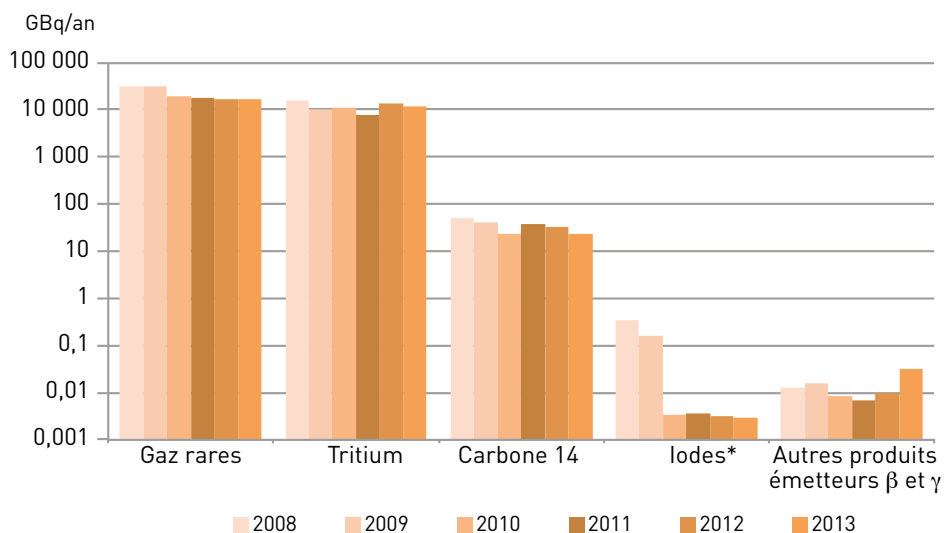


FIGURE 2 / REJETS GAZEUX ET LIQUIDES DES INSTALLATIONS DU SITE DE SACLAY SUR LA PÉRIODE 2008-2013

Activité totale des effluents gazeux INB + ICPE (GBq/an).



*Les activités en iodes rejetées en 2008 et 2009 incluent celles de CIS-Bio.

Activité totale des effluents liquides INB + ICPE (GBq/an).

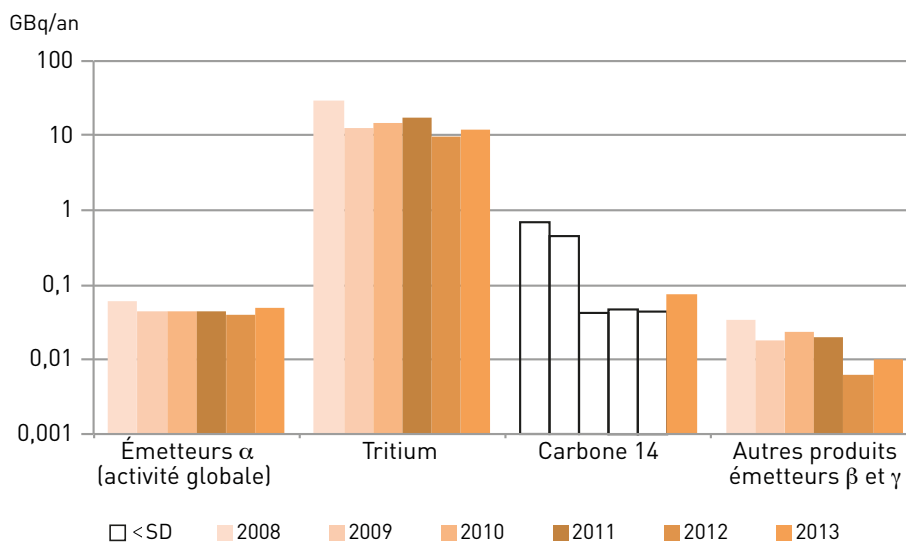


TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DU SITE DE SACLAY

Milieu surveillé ou nature du contrôle	CEA	IRSN
Air au niveau du sol	6 points de prélèvements continus ; 4 mesures α et β global	-
Rayonnement gamma ambiant	6 points dans l'environnement plus 21 points de clôture.	1 point
Air au niveau du sol	4 points de prélèvements hebdomadaires ; mesures ^3H	2 stations de prélèvements en continu d'aérosols à 7 et 700 m ³ /h avec une mesure de spectrométrie gamma à une fréquence hebdomadaire
Pluie	2 points de prélèvements hebdomadaires et mensuels ; mesures de ^3H et β global	1 point de prélèvements et 1 mesure mensuelle ^3H
Milieu récepteur des rejets liquides (eau et sédiments)	14 points de prélèvements continus, analyses hebdomadaires à mensuelles ^3H , α et β global, potassium, U, Sr, spectrométrie γ	Eau : 5 points de prélèvements et 1 mesure semestrielle de : ^3H , α et β global, potassium, Uiso, Sr, spectrométrie γ Sédiments : 1 point de prélèvements et 1 mesure semestrielle de Pu, Am, Sr, spectrométrie γ Faune et flore aquatiques : mesures ^3H libre et liée, ^{14}C , spectrométrie γ
Eaux souterraines	23 points de prélèvements mensuels à annuels ; mesures ^3H , α et β global	2 points de prélèvements et mesures semestrielles par point en ^3H , α et β global et potassium
Lait	3 points de prélèvements mensuels ; mesures ^3H libre et lié, ^{129}I , ^{90}Sr et spectrométrie γ	1 point de prélèvements trimestriels et 1 mesure de ^3H libre, ^{129}I et spectrométrie γ
Végétaux (fruits, légumes, herbes)	9 points de prélèvements mensuels ; mesures spectrométrie γ , ^3H libre et lié et ^{90}Sr	6 points de prélèvements annuels avec ^3H libre et lié, ^{14}C et spectrométrie γ
Céréales	-	1 point de prélèvements annuels et 1 mesure de ^3H lié et spectrométrie γ

Influence du site de Saclay sur son environnement et exposition de la population

• Le tritium

Les mesures de surveillance environnementale mettent en évidence un marquage dû aux rejets de tritium. Des activités de tritium supérieures au bruit de fond radiologique naturel ou hérité des retombées anciennes (cf. chapitre 2), sont ainsi observées dans tous les compartiments de l'environnement. Les analyses des prélèvements d'air effectués au niveau des stations de Saclay, Saint-Aubin, Villiers-le-Bâcle et Orsigny permettent de mesurer le tritium sous forme de vapeur d'eau (HTO) et le tritium sous forme de gaz (HT et formes organiques comme par exemple le CTH₃) (cf. figure 3). L'activité volumique en tritium dans l'air au niveau de ces 4 stations est le plus souvent

inférieure aux seuils de décision ($\approx 0,2 \text{ Bq/m}^3$), mais présente ponctuellement des valeurs nettement supérieures au bruit de fond actuel du tritium atmosphérique (de l'ordre de $0,01 \text{ Bq/m}^3$ d'air pour la vapeur d'eau tritiée). La valeur maximale de tritium dans la vapeur d'eau tritiée a été mesurée dans un prélèvement effectué sur la station de Saclay : $2,30 \text{ Bq/m}^3$ (cf. figure 3) ; la valeur des formes gaz tritiés (HT + formes organiques) la plus élevée provient d'un prélèvement de la station de Saint-Aubin : $2,29 \text{ Bq/m}^3$.

De même, si la grande majorité des activités en tritium mesurées dans l'eau de pluie se situe en dessous du seuil de décision, des activités supérieures au bruit de fond (1 à 2 Bq/L) sont ponctuellement mesurées : comprises entre $3,96 \text{ Bq/L}$ et $82,00 \text{ Bq/L}$ notamment dans l'eau de pluie prélevée à la station de Saclay Village, sous les vents dominants du site (cf. figure 4).

FIGURE 3 / ENSEMBLE DES ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS L'AIR (HTO + GAZ TRITIÉS) PRÉLEVÉ DANS LES STATIONS DE SURVEILLANCE À PROXIMITÉ DU CEA DE SACLAY (Bq/m³)

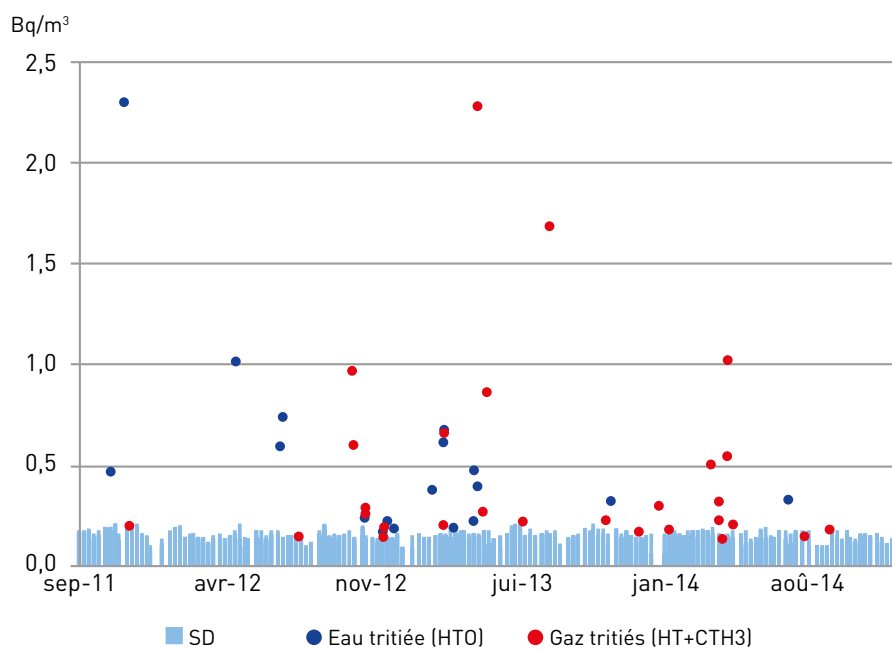
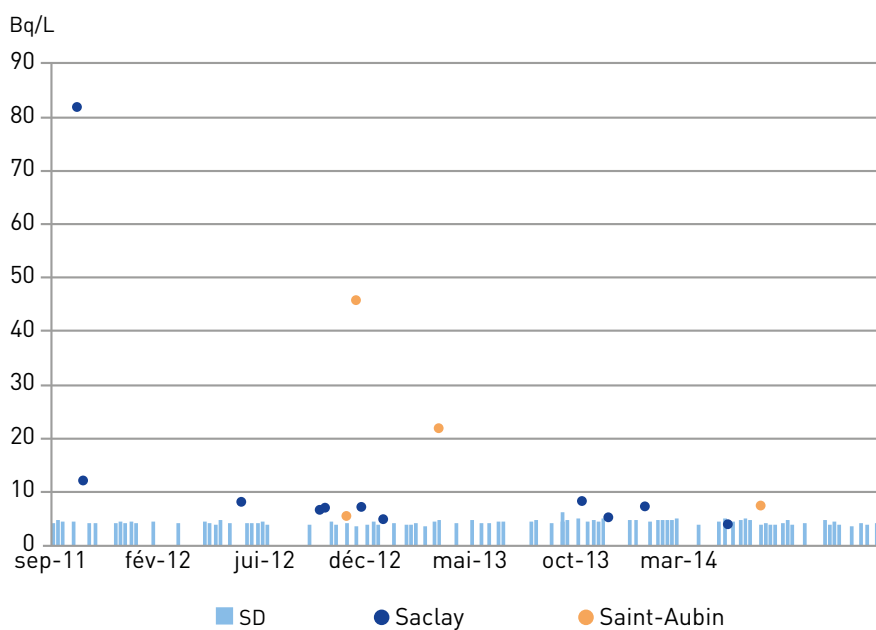


FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE COLLECTÉE DANS LES STATIONS DE SURVEILLANCE À PROXIMITÉ DU CEA DE SACLAY (Bq/L)



En conséquence de ces activités en tritium mesurées sporadiquement dans l'air et dans l'eau de pluie, des activités en tritium des herbages et du lait peuvent également dépasser le bruit de fond radiologique (de l'ordre de 1 à 2 Bq/l ou Bq/kg frais, cf. figure 5).

Enfin, l'influence des rejets passés ou présents du site est également détectable dans les eaux de surface et les eaux souterraines. Ainsi, dans l'aqueduc des Mineurs, canalisant les rejets du site, les activités en tritium sont de l'ordre de quelques dizaines de Bq/L. (cf. figure 6).

L'eau, les roseaux et les poissons prélevés annuellement dans l'étang Vieux et l'étang Neuf témoignent d'un marquage dû aux rejets en tritium présents du centre du CEA de Saclay. La figure 7, montre ainsi une bonne relation entre l'activité détectée dans l'eau et celle détectée dans la faune et la flore des étangs. L'activité maximale en tritium libre détectée dans l'eau d'Étang Vieux a atteint 22,50 Bq/L.

Concernant les eaux souterraines, les piézomètres de F41 à F49 situés à l'intérieur du site de Saclay prélèvent les eaux les plus tritiées, dépassant toutes le bruit de fond, avec une concentration moyenne de 59,46 Bq/L en novembre 2011 (cf. figure 8). À l'extérieur du CEA les concentrations sont plus faibles en moyenne de 34,0 Bq/L.

Pour estimer l'impact dosimétrique des rejets gazeux et liquides sur la période de 2011 à 2013, des hypothèses très majorantes ont été choisies pour les voies de transferts considérées entre l'environnement et l'homme : l'ingestion, l'inhalation et le passage au travers de la peau (transcutané). Le profil type retenu correspond à un adulte qui séjournerait 100 % de son temps dans l'environnement immédiat du site, consommerait 100 % de son eau de boisson provenant d'un forage dans la nappe phréatique des sables de Fontainebleau, mangerait 8 kg de poissons par an provenant de l'Étang Vieux et l'Étang Neuf, et s'approvisionnerait en légumes et en produits animaux produits localement. Sur la base de ces hypothèses, la dose totale engagée par cette personne serait de 0,28 µSv/an. L'ingestion représenterait alors 75 % (dont 98 % par ingestion d'eau) de cette dose devant l'inhalation (17 %) et la voie transcutanée (8 %). Cette dose de 0,28 µSv/an due au tritium, basée sur les mesures réalisées durant la période 2011-2013 est tout à fait cohérente avec celle estimée par le CEA pour 2013 sur la base des rejets : 0,23 µSv/an pour un adulte (le tritium représente 21 % de la dose totale à l'adulte de 1,1 µSv/an estimée par le CEA dans le rapport TSN de 2013).

FIGURE 5 / ACTIVITÉS DU TRITIUM LIBRE DANS LE LAIT ET DANS L'HERBE DANS L'ENVIRONNEMENT DU CEA DE SACLAY

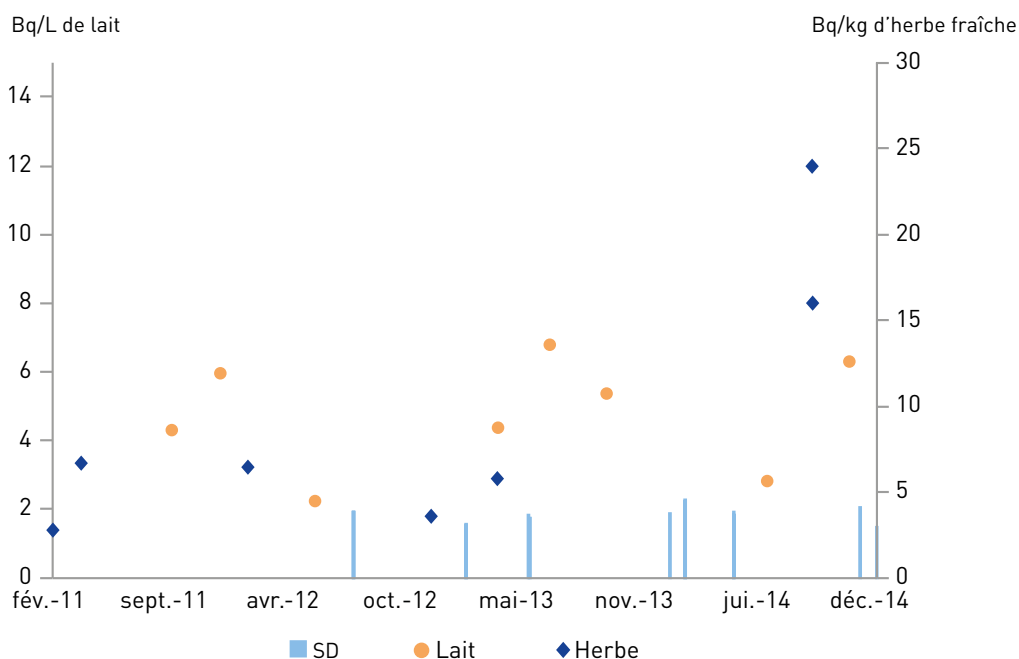
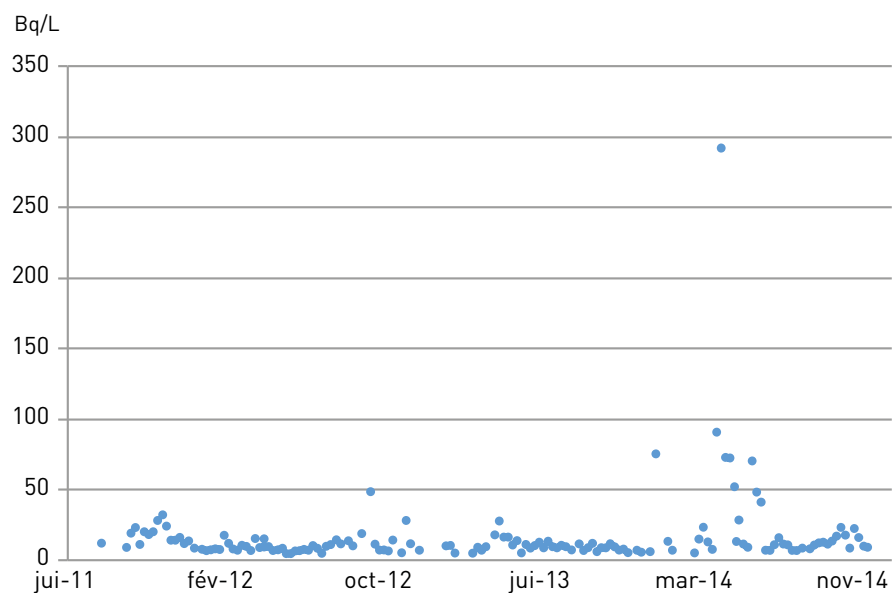


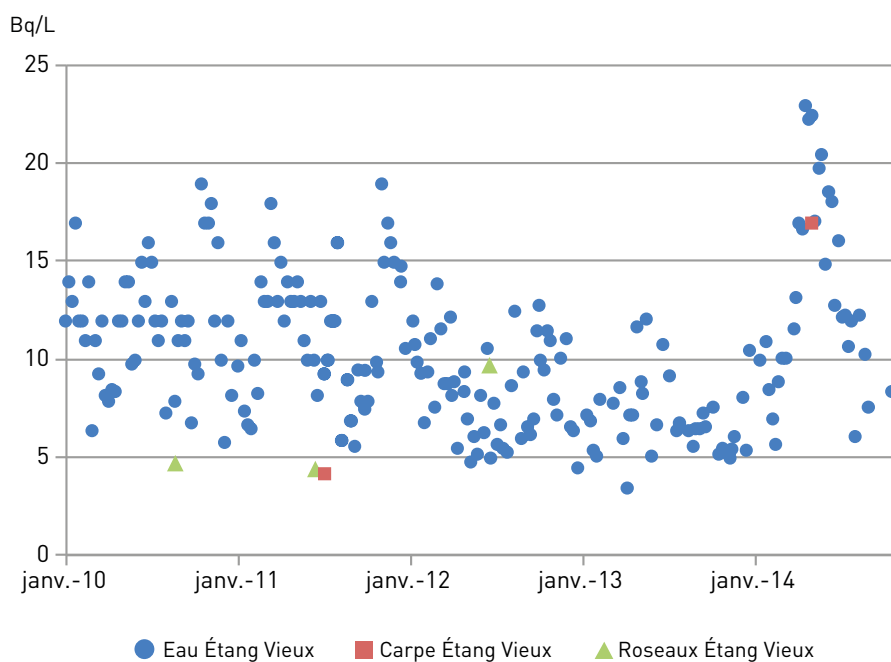
FIGURE 6 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ DU TRITIUM DANS L'EAU ARRIVÉE PAR L'AQUEDUC DES MINEURS À L'ÉTANG VIEUX (Bq/L)



Prélèvements de sédiments dans l'Étang Vieux de Saclay

FIGURE 7 / ACTIVITÉS DU TRITIUM LIBRE DANS LES POISSONS, LES VÉGÉTAUX AQUATIQUES ET L'EAU DES ÉTANGS VIEUX ET NEUF (Bq/L)

Étang Vieux



Étang Neuf

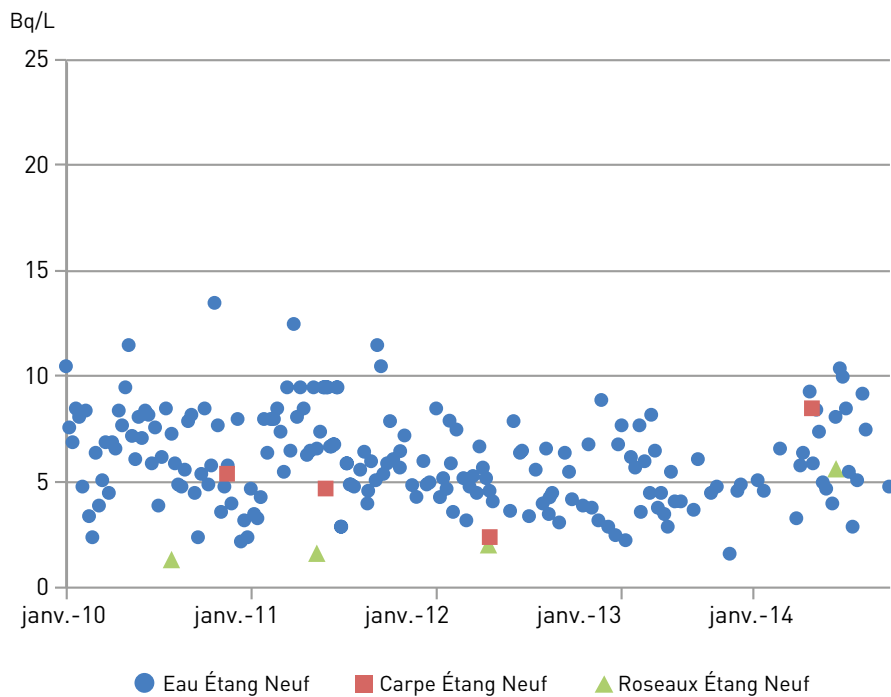
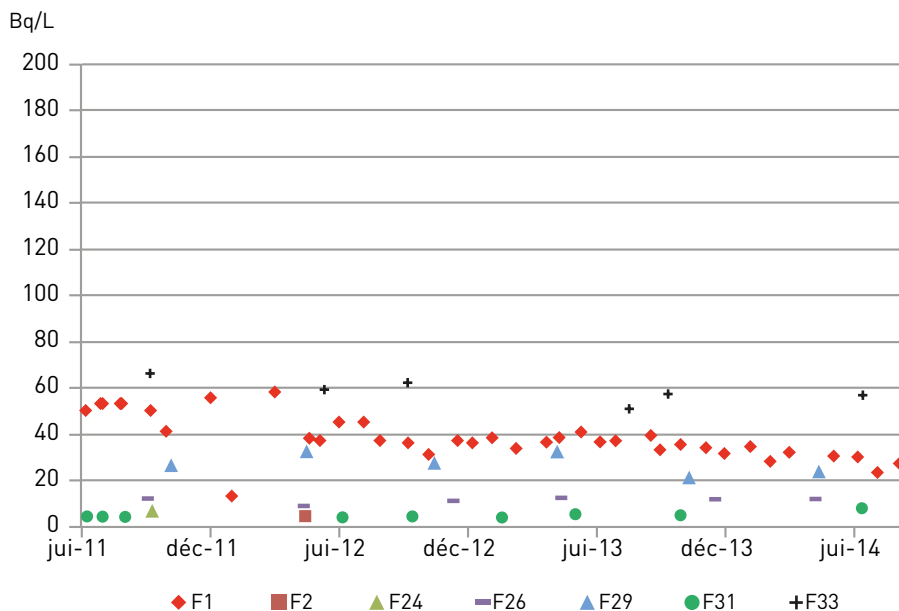
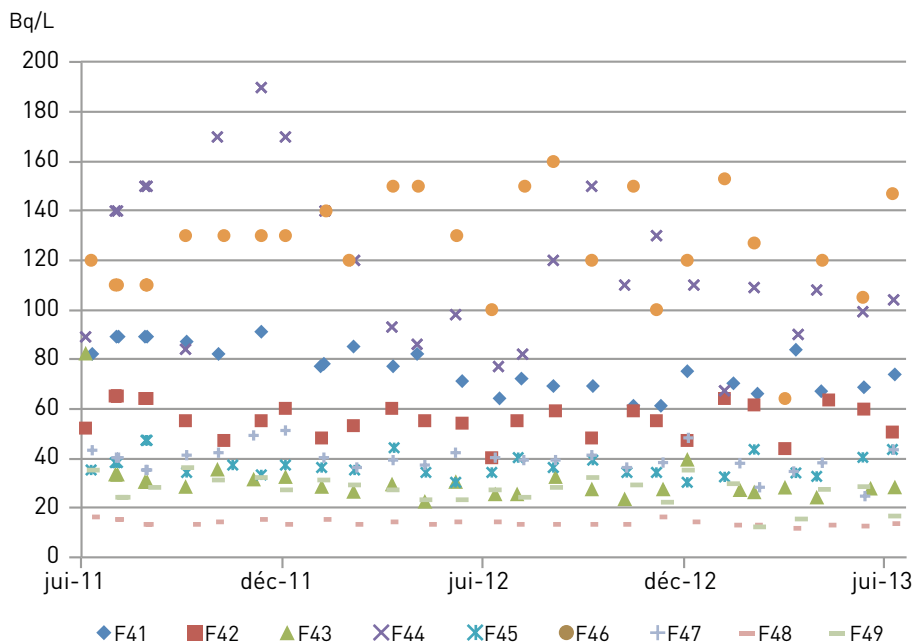


FIGURE 8 / ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN TRITIUM DANS L'EAU DE NAPPE DU PLATEAU DE SACLAY (Bq/L)

Extérieur du site de Saclay



Intérieur du site de Saclay



• Carbone 14

Les rejets atmosphériques de carbone 14 du site de Saclay, très modérés, marquent peu l'environnement terrestre. Si au cours de la période 2009-2010, quelques échantillons de lait, d'herbages et de légumes ont pu témoigner d'une influence discrète du site, cela n'a pas été le cas sur la période 2011-2014. Ainsi, les activités mesurées dans le lait sur la période sont inférieures à 20 Bq/l, valeur proche du bruit de fond naturel de ce radionucléide. Il en est de même des herbages et des légumes.

Bien que les rejets liquides annuels de carbone 14 soient également faibles, les activités mesurées dans les poissons de l'Étang Vieux et de l'Étang Neuf sont très élevées. Sur la période d'observation, les activités des 6 échantillons prélevés dans l'Étang Vieux vont de 360 à 5160 Bq/kg frais pour une moyenne de 1395 Bq/kg frais. Celles de l'Étang Neuf sont plus faibles et moins variables allant de 360 à 770 Bq/kg frais pour une moyenne

de 494 Bq/kg frais. La variabilité des résultats obtenus est imputable à la variabilité des espèces prélevées et à leur âge. Ces valeurs sont à comparer à un bruit de fond naturel de ce radionucléide dans les poissons de l'ordre de 30 Bq/kg frais. La durée de vie des poissons prélevés (souvent des carpes) est importante, de l'ordre de plusieurs décennies. Il est donc probable que ces activités de carbone 14 mesurées soient le résultat de l'accumulation de plusieurs années, voire dizaines d'années de rejets.

La pêche dans l'Étang Vieux, classé ZNIEFF¹ est interdite ; ce n'est pas le cas dans l'Étang Neuf. Une personne qui consommerait 5,3 kg/an² de poissons pêchés dans l'Étang Neuf, avec une activité moyenne ajoutée de 464 Bq/kg, recevrait une dose de 1,4 µSv. Cette valeur est tout à fait cohérente avec celle estimée par le CEA dans son rapport TSN de 2012 : 3,6 µSv/an en considérant une consommation de 8 kg/an à l'activité mesurée cette année-là (770 Bq/kg frais).



Le site de Saclay

1. Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Floristique et Faunistique.

2. Cette valeur est proposée par l'InVS-ANSES et l'AFSSA pour la consommation annuelle de poissons d'eau douce.

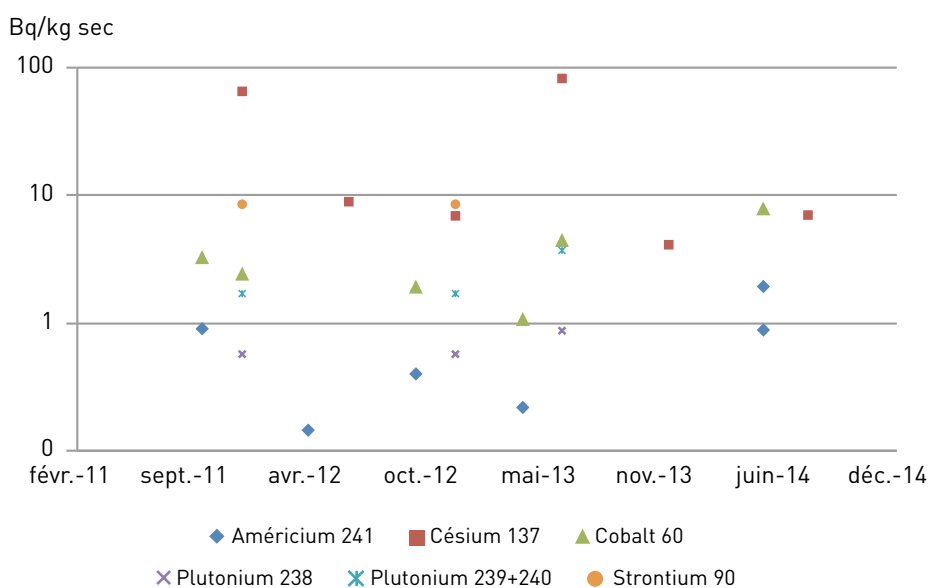
• **Les autres radionucléides**

Exceptés pour le césium 137 rémanent des retombées anciennes, les analyses effectuées sur les filtres d'aérosols de la station à grand débit de l'IRSN installée à Orsay, révèlent généralement des valeurs inférieures au seuil de décision. Toutefois entre juin 2011 et décembre 2014, de l'iode 131 et du cobalt 60 ont été ponctuellement mesurés. L'iode 131 a été mesuré 6 fois durant cette période. L'activité la plus élevée de 3,2 µBq/m³ mesurée le 10 novembre 2011 correspond très probablement à un des nombreux rejets d'un institut hongrois (Institut des radio-isotopes de Budapest) dont les conséquences dans l'air ont été décelées dans plusieurs pays européens durant toute l'année 2011. Parmi les autres activités plus faibles, comprises entre 0,14 et 0,27 µBq/m³, mesurées ponctuellement en 2013 et 2014, celle du 27 juin 2013 est probablement liée à un rejet de l'hôpital Saint-Antoine à Paris qui a fait l'objet d'une déclaration à l'ASN. Les quatre autres résultats de mesure d'iode 131 sont vraisemblablement imputables aux rejets du site

de Saclay. Il en est de même des traces de cobalt 60 allant de 0,02 à 0,14 µBq/m³ mesurées à seulement 3 reprises durant la période 2011-2014.

Les prélèvements de sédiments dans l'aqueduc des mineurs révèlent des traces de césium 137, de cobalt 60, de plutonium, de strontium et d'américium 241 (cf. figure 9). Celui-ci est imputable en partie aux rejets passés d'effluents liquides du site et principalement au pic de pollution survenu en 1990 (Bilan radiologique de l'environnement français en 2007). Des traces de césium 137 et de strontium 90 sont encore détectables dans les étangs. Les niveaux d'activité sont en moyenne inférieurs à 0,0022 Bq/L dans l'eau. Pour les roseaux les niveaux de ¹³⁷Cs sont en moyenne de 0,5 Bq/kg frais et pour le ⁹⁰Sr de 0,21 Bq/kg frais. Dans les poissons les analyses relèvent en moyenne 0,58 Bq/kg frais de césium 137. Le césium 137 et le strontium 90 détectés résultent des anciens dépôts et des retombées atmosphériques.

FIGURE 9 / ACTIVITÉS MASSIQUES DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES D'INTÉRÊT PRÉSENTS DANS LES PRÉLÈVEMENTS DE SÉDIMENTS DANS L'AQUEDUC DES MINEURS À L'ÉTANG VIEUX (Bq/kg sec)



Le site de Fontenay-aux-Roses

Le site de Fontenay-aux-Roses (cf. figure 1), est implanté sur le plateau de Fontenay-aux-Roses en zone urbaine, au sud/sud-ouest de Paris (cf. figure 5). Depuis 2007, les installations nucléaires de base du centre sont en arrêt définitif. Le programme d'assainissement des laboratoires et des installations nucléaires (baptisé Aladin) a été initié dès 1999. Les installations nucléaires laissent ainsi la place au développement d'activités situées exclusivement dans le domaine des sciences du vivant.

Les rejets radioactifs

Les aérosols produits à l'intérieur des installations sont filtrés par deux barrières de filtres THE (Très Haute Efficacité) avant le point de rejet dans l'environnement. Les émissaires sont équipés de dispositifs de mesure de la radioactivité des

effluents gazeux. Les effluents rejetés sont constitués potentiellement d'aérosols, de gaz rares et de traces d'halogènes.

La surveillance des effluents radioactifs gazeux des INB est assurée par des dispositifs de mesure en continu de la radioactivité, placés dans les cheminées, après les filtres THE, dernière barrière de filtration avant rejet dans l'environnement. Ils assurent en temps réel la détermination de l'activité des aérosols émetteurs bêta et de l'activité des gaz radioactifs. Neuf émissaires sont équipés de moniteurs de contrôle en temps réel de l'activité des aérosols émetteurs bêta, dont cinq contrôlent également les aérosols émetteurs alpha. Quatre d'entre eux sont équipés d'un contrôle de gaz.

Pour les gaz rares, les résultats de mesure issus de ces moniteurs de contrôle sont tous inférieurs aux limites de détection. L'activité totale « halogènes + aérosols » bêta rejetée est de 0,006 GBq depuis 2012 (cf. figure 2).

FIGURE 1 / CENTRE CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES

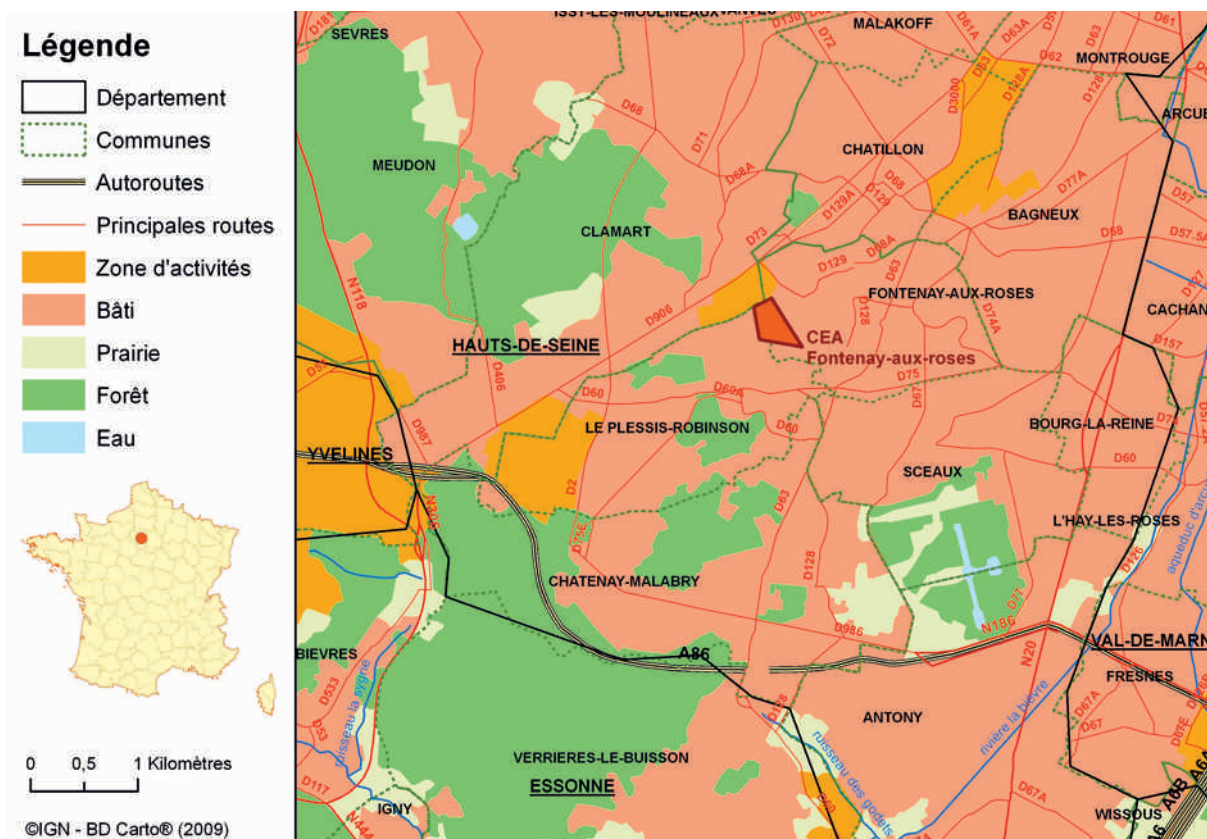
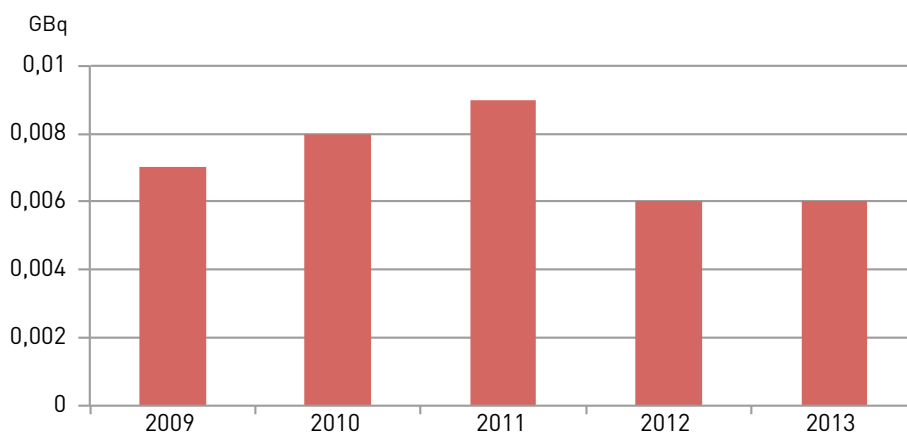


FIGURE 2 / ACTIVITÉS TOTALES (HALOGÈNES ET ÉMETTEURS BÊTA) REJETÉES DANS L'AIR PAR LE CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES ENTRE 2009 ET 2013 (GBq)



Les effluents des laboratoires des anciennes INB sont susceptibles de contenir des produits radioactifs. Les liquides contenant des substances radioactives sont recueillis dans des cuves ou des conteneurs destinés à être évacués vers une filière nucléaire. La station de contrôle des effluents de l'égout urbain, située en aval immédiat du centre est également équipée de dispositifs de contrôle de la radioactivité et d'un dispositif de prélèvement en continu qui permet de recueillir un échantillon représentatif des effluents de l'égout urbain. Les dispositifs installés aux émissaires et à l'égout urbain fonctionnent en temps réel et un système d'alarme est relié au tableau de contrôle de l'environnement du centre de Fontenay-aux-Roses.

La surveillance radiologique des rejets liquides porte sur les émetteurs alpha (mesure globale), les émetteurs bêta-gamma (mesure globale) et le tritium (cf. figure 3).

Les activités en tritium mesurées dans les émissaires des rejets d'effluents liquides du site dépassent régulièrement les seuils de décision et peuvent dépasser 30 Bq/L (max. de 37 Bq/L). Ces activités ne sont pas imputables aux rejets du site. En effet, des activités du même ordre sont mesurées dans l'eau de la Seine qui approvisionne le centre de Fontenay-aux-Roses. Elles sont liées aux rejets de la centrale EDF de Nogent.

FIGURE 3 / ACTIVITÉS TOTALES ALPHA, BÊTA ET TRITIUM REJETÉES PAR VOIE LIQUIDE PAR LE CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES ENTRE 2009 ET 2013 (GBq)

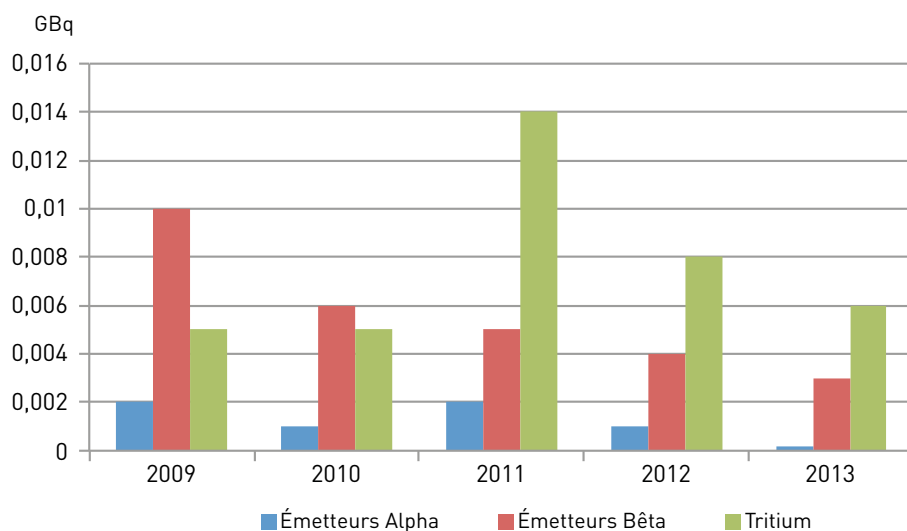
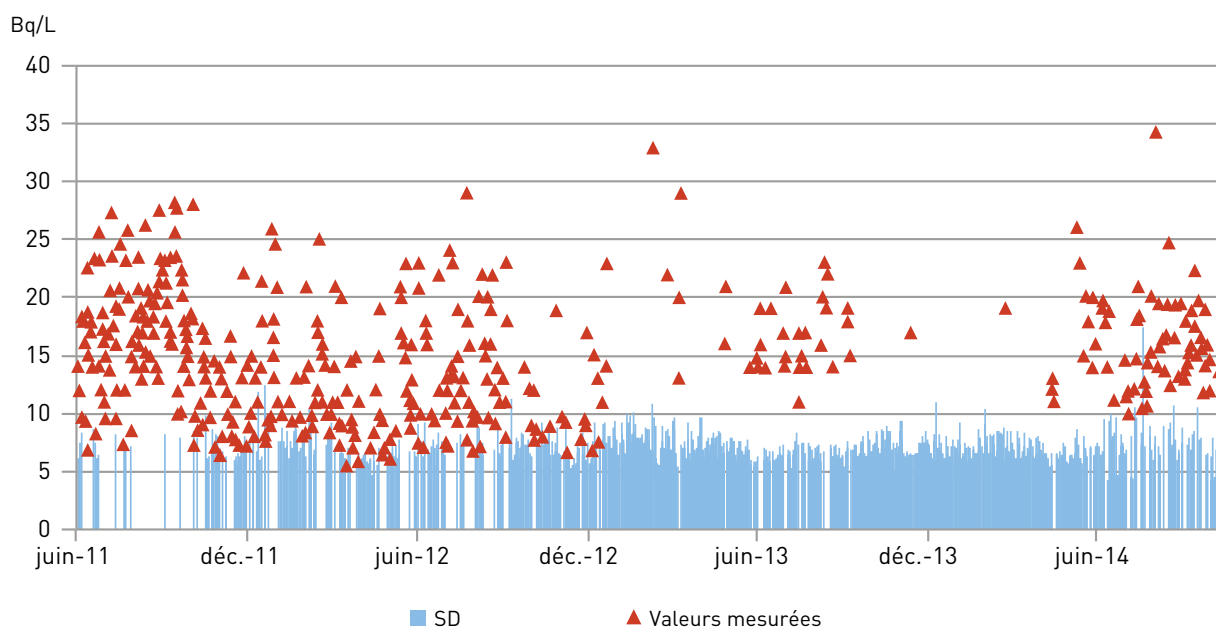


FIGURE 4 / ACTIVITÉS EN TRITIUM DANS LES EAUX PRÉLEVÉES PAR HYDROCOLLECTEUR DANS L'ÉGOUT URBAIN DU CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES ENTRE 2011 ET 2014 (Bq/L)



La surveillance radiologique de l'environnement du site

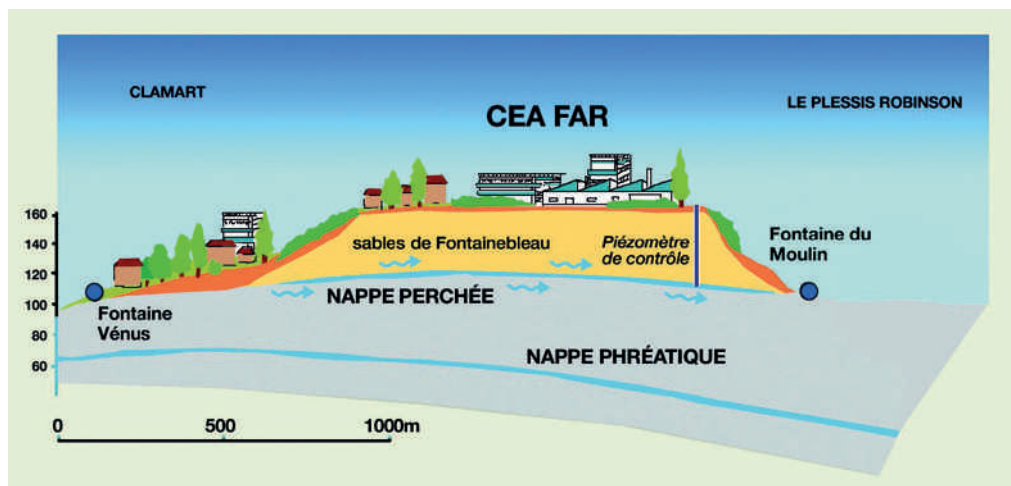
Le CEA effectue près de 6 000 mesures par an d'échantillons issus de tous les compartiments de l'environnement (air, eau, sol). La surveillance atmosphérique est réalisée à partir de mesures effectuées dans quatre stations fixes (FAR Atmos, FAR 2, Clamart et Bagneux), situées à des distances allant de 0,2 à 2 km autour du centre. La surveillance de l'air comprend la mesure des activités alpha et bêta des poussières atmosphériques collectées sur filtres, la recherche d'halogènes sur les cartouches de prélèvement, la mesure de l'irradiation ambiante et la mesure du tritium gazeux.

Les eaux (eaux de pluie, eaux souterraines et de surface) font également l'objet d'une surveillance radiologique réalisée à partir de mesures dans l'environnement du centre. Les eaux de pluie sont collectées au moyen de pluviomètres et font l'objet de mesures alpha et bêta globales ainsi que du tritium.

La nappe perchée, située à 65 mètres de profondeur au-dessus de la nappe phréatique générale (cf. figure 5), est surveillée mensuellement par l'analyse en laboratoire de prélèvements effectués dans six forages (piézomètres). Deux points de résurgence de la nappe perchée, la fontaine du Lavoisier et la fontaine du Moulin à Fontenay-aux-Roses, font l'objet d'un contrôle mensuel. La surveillance des eaux de surface se fait par des prélèvements périodiques d'eaux et de sédiments de l'étang Colbert situé à proximité du centre.

Des échantillons de sédiments, de sols et de végétaux sont prélevés pour suivre et déterminer l'impact des rejets sur l'environnement du CEA de Fontenay-aux-Roses (prélèvements mensuels de végétaux en quatre points situés dans les stations de surveillance extérieures au centre, prélèvements annuels d'échantillons de sol, en surface, sur le centre et dans les quatre stations de surveillance extérieures au centre).

FIGURE 5 / SCHÉMA DE COUPE EN SOUS-SOL SOUS LE CENTRE CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES (SOURCE CEA)



Influence du site de Fontenay-aux-Roses sur l'environnement

L'influence des rejets radioactifs du site de Fontenay-aux-Roses sur son environnement est extrêmement faible.

Le tritium atmosphérique n'a été détecté que 2 fois entre juillet 2011 et décembre 2014 avec des valeurs proches des seuils de décision (0,2 et 0,3 Bq/m³).

L'iode 131 gazeux prélevé sur les cartouches n'est jamais détecté. Par ailleurs, aucune valeur anormale de l'indice d'activité alpha (valeurs comprises entre 0,78 et 0,02 mBq/m³) et bêta (valeurs comprises entre 2,6 et 0,1 mBq/m³) dans les aérosols atmosphériques n'a été mise en évidence pendant cette période.

Le tritium est également mesuré très sporadiquement dans les eaux de pluie collectées à proximité du site. L'activité maximale entre juillet 2011 et décembre 2014 a été de 9,9 Bq/L.

L'analyse des radionucléides des eaux de l'étang Colbert ne présente pas de marquage alpha global particulier. L'américium 241 et les césiums 134 et 137 n'y sont pas détectés. Le tritium est parfois détecté au-dessus des seuils de décision (cf. figure 6) à des niveaux oscillant entre 3 et 19 Bq/L. Ces résultats, supérieurs au bruit de fond radiologique, sont donc imputables aux rejets passés du site CEA de Fontenay-aux-Roses.



Prélèvement d'un filtre aérosol

© F. Jamin/CEA

FIGURE 6 // ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'ÉTANG COLBERT (PLESSIS-ROBINSON) À PROXIMITÉ DU CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/L)

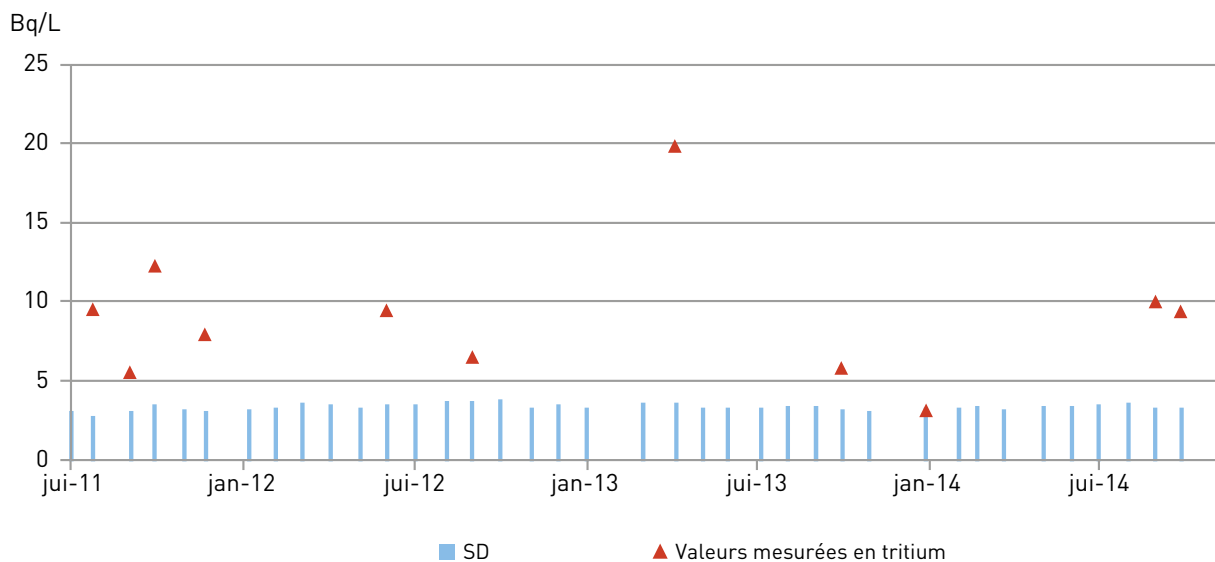
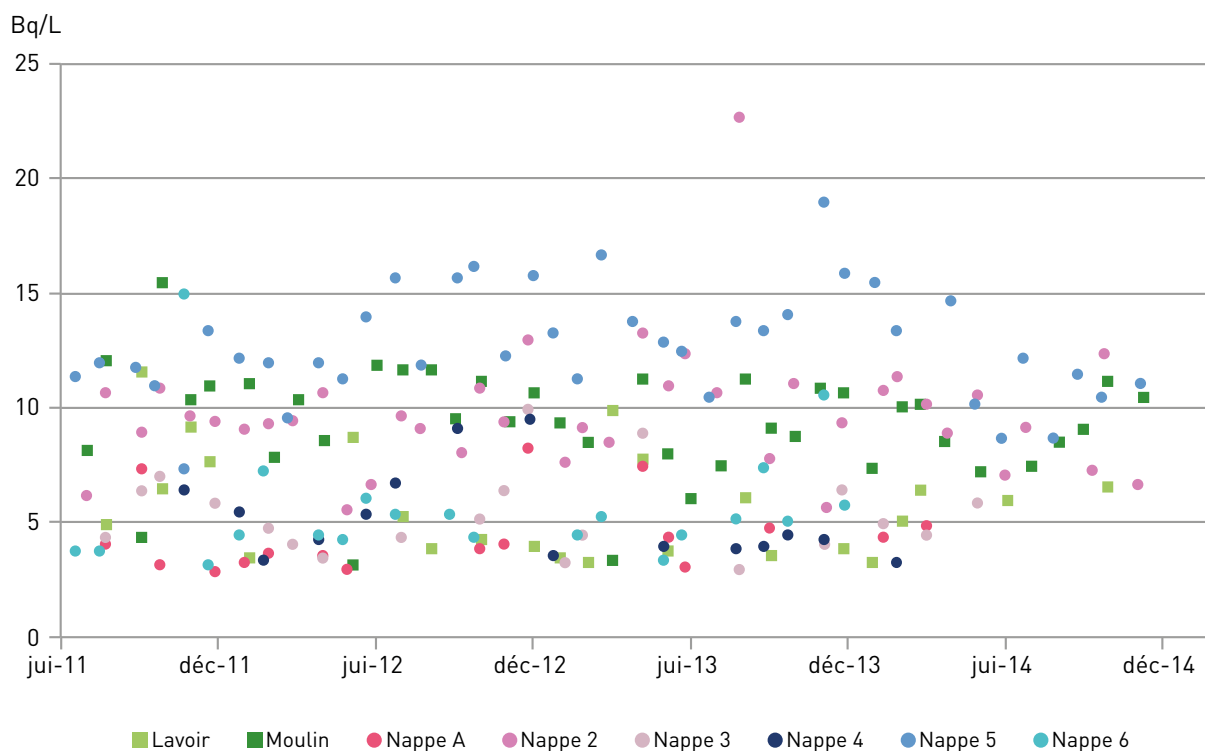


FIGURE 7 // ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM MESURÉES DANS LES EAUX SOUTERRAINES À PROXIMITÉ DU CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/L)



Le strontium 90 est le seul radionucléide artificiel également régulièrement mesuré dans les eaux de l'étang Colbert à des activités proches des limites de détection (entre 0,002 et 0,005 Bq/L). Ces activités sont globalement à mettre en relation avec les retombées des tirs atmosphériques d'armes nucléaires militaires.

Les mesures réalisées dans les prélèvements réalisés dans la nappe phréatique perchée (points A, B, C, F, G et H) et dans les deux points de résurgences (fontaine du Moulin, fontaine du Lavoir) présentent des activités en tritium comprises entre le seuil de décision (de l'ordre de 3 Bq/L) et 22,6 Bq/L (cf. figure 7). Ces résultats, supérieurs au bruit de fond hors influence des installations nucléaires, sont imputables aux rejets passés du site CEA de Fontenay-aux-Roses.

En ce qui concerne le compartiment terrestre et les denrées, les résultats associés aux prélèvements de d'herbe effectués à proximité du centre de Fontenay-aux-Roses par le CEA relèvent soit de la radioactivité naturelle (^{40}K , ^7Be ...), soit de la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl ou de celles des essais d'armes nucléaires (^{137}Cs ...).



© DR

Vue aérienne du site de Fontenay-aux-Roses



© DR

Piézomètre de prélèvement d'eau de nappe phréatique

3.5. LES BASES NAVALES NUCLÉAIRES

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

Ports militaires de Brest et de l'Île-Longue

Le port militaire de Brest (Finistère) est le siège de la Force océanique stratégique, et la base française des sous-marins nucléaires d'attaque. Depuis 1970, la base opérationnelle de l'Île-Longue assure l'entretien courant des sous-marins lanceurs d'engins avec deux grands pôles dans le domaine nucléaire :

- les missiles : le montage final des missiles nucléaires à partir de sous-ensembles en provenance de l'industrie de défense et la mise en place de ces missiles à bord des sous-marins ;
- la chaufferie : le maintien des capacités opérationnelles des sous-marins nucléaires français en assurant, en particulier, l'entretien du réacteur, élément indispensable à la propulsion et à la production électrique.

Port militaire de Cherbourg

Le port militaire de Cherbourg (Manche), avec en son sein la DGA (Direction générale de l'armement), est principalement dédié à la construction ou au démantèlement de sous-marins à propulsion nucléaire (sous-marins nucléaires d'attaque et sous-marins nucléaires lanceurs d'engins) construits par la Direction de la construction navale et des services (DCNS ; cf. figure 1). Ces activités mènent à considérer les zones suivantes :

- la zone du Homet pour le démantèlement ;
- la zone Cachin, à proximité du chantier Laubeuf (DCNS), pour la construction neuve ;
- la jetée du Homet pour le stationnement des sous-marins nucléaires en attente de démantèlement ou d'essais à la mer ;
- le bassin Napoléon III pour le stationnement des sous-marins nucléaires en cours de démantèlement.

Il assure également un soutien logistique aux forces navales françaises et étrangères de passage.

FIGURE 1 / PORT MILITAIRE DE CHERBOURG



© Marine nationale

Port militaire de Toulon

Le port militaire de Toulon (Var) est la principale base navale française, avec celle de Brest. Il abrite notamment la majeure partie de la force d'action navale, comprenant les sous-marins nucléaires d'attaque. Toulon est également le port d'attache de 37 bâtiments de surface, dont le porte-avions Charles de Gaulle (premier bâtiment de surface français à propulsion nucléaire).

Au sein de cette emprise d'une superficie d'environ 190 hectares, trois zones géographiques sont plus particulièrement concernées : la zone d'accueil et d'entretien des sous-marins nucléaires d'attaque (SNA) qui comprend notamment une installation nucléaire de base secrète (INBS), la zone d'accueil du porte-avions « Charles de Gaulle » située à l'ouest de la base navale et la zone réservée aux entretiens de longue durée de ce porte-avions située à l'est de la base navale. Dans ces différentes zones, les chaufferies nucléaires des sous-marins ou du porte-avions sont toujours à l'arrêt ou à très faible puissance.

• Les rejets radioactifs

Les installations nucléaires de la Marine nationale génèrent des rejets radioactifs gazeux liés aux activités décrites précédemment et notamment à l'entretien des sous-marins à propulsion nucléaire.

Les principaux radionucléides artificiels susceptibles d'être présents dans ces rejets sont notamment les gaz rares (krypton, xénon), le tritium et le carbone 14. Les émetteurs gamma font également l'objet d'un suivi régulier (réseau de mesure en continu du débit de dose gamma ambiant, mesures différées sur des prélèvements environnementaux).

TABLEAU 1 / SYNTHÈSE DES ÉMISSIONS EN TRITIUM (EN GBq) ISSUES DES INSTALLATIONS DE LA MARINE NATIONALE

Année	Brest et Île-Longue		Cherbourg		Toulon	
	Rejets liquides	Rejets gazeux	Rejets liquides	Rejets gazeux	Rejets liquides	Rejets gazeux
2009	0,284	13,4	0,214	-	0,24	-
2010	-	4,35	0,017	-	13,6	0,502
2011	-	22,46	0,479	-	23,4	-
2012	-	21	0,414	-	25,5	0,051
2013	1,32	23,2	10,3	-	45,5	-

La surveillance radiologique de l'environnement

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.

Pour le compartiment atmosphérique, la surveillance de la radioactivité de l'environnement réalisée par l'exploitant et l'IRSN est assurée par des mesures en continu (rayonnement gamma ambiant) ou en différé (mesures bêta globales, du tritium et des émetteurs gamma sur les poussières atmosphériques et les eaux de pluie, mesures du carbone 14 et/ou du tritium atmosphériques) à partir de plusieurs stations de prélèvement pour chaque site.

La surveillance des ports militaires est également assurée au travers de nombreux prélèvements réguliers dans le milieu aquatique (eau de mer, sédiments – cf. figure 2, crustacés, mollusques, poissons, algues, posidonies) sur lesquels des mesures de l'activité bêta globale, du tritium, de spectrométrie gamma et alpha (Pu, Am) sont réalisées.

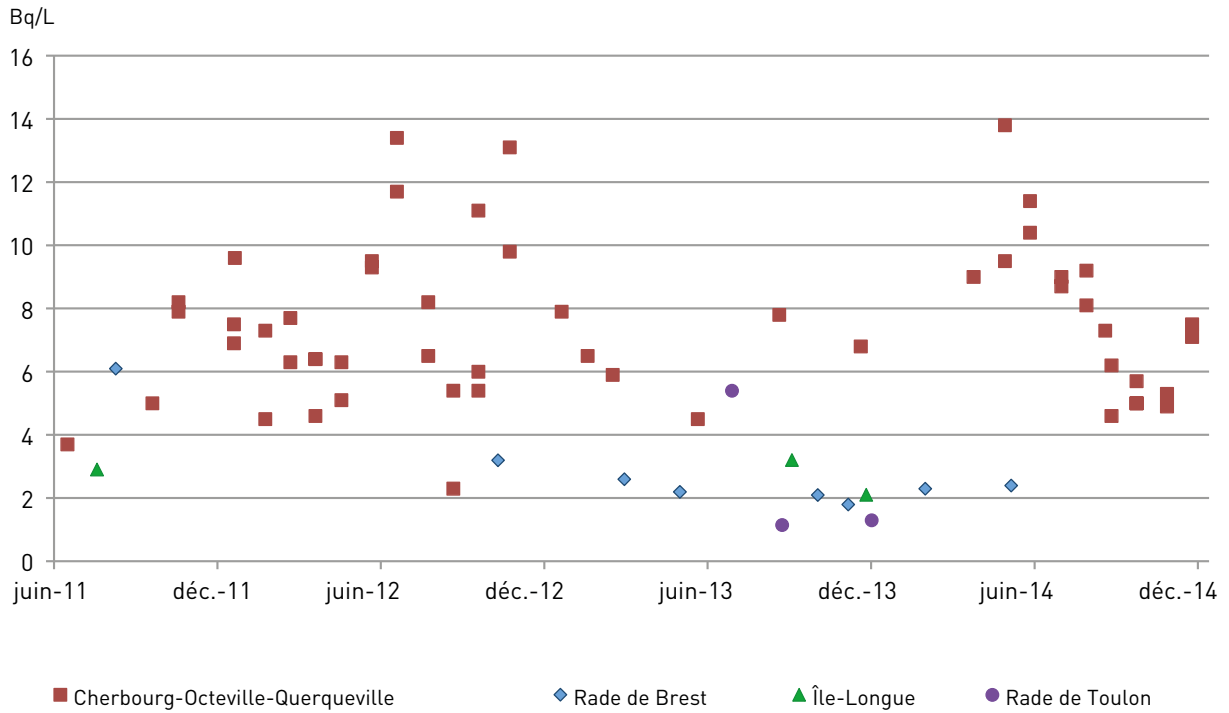
Dans le milieu terrestre, des prélèvements de lait et de végétaux (herbe, salade) sont réalisés sous les vents dominants, complétés par des prélèvements sur les principales productions agricoles (fruits, légumes) et sur la couche superficielle des terres. Les prélèvements terrestres font généralement l'objet d'une mesure du tritium et d'une spectrométrie gamma ainsi que d'une mesure de carbone 14 pour les végétaux et le lait.

À titre d'exemple, la surveillance du port militaire de Toulon s'effectue chaque année à partir de plus de 1 700 prélèvements et 6 200 mesures réalisés dans les milieux atmosphériques, terrestres et aquatiques.

FIGURE 2 / PRÉLÈVEMENT DE SÉDIMENTS MARINS



FIGURE 4 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'EAU DE MER PRÉLEVÉE À PROXIMITÉ DES PORTS MILITAIRES DE LA MARINE NATIONALE ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2014 (Bq/L) – VALEURS SUPÉRIEURES AU SEUIL DE DÉCISION UNIQUEMENT



© Marine nationale

Prélèvement de sédiments dans la rade de Brest

La plupart des mesures effectuées sur les autres composantes du milieu marin ne mettent pas en évidence une influence radiologique des installations de la Marine nationale. Les radionucléides mesurés proviennent soit des rejets de La Hague (environnement de Cherbourg), soit de la rémanence des retombées anciennes (cf. chapitre 2). Il en est ainsi du césium 137 et des isotopes du plutonium. L'iode 131 mesuré de façon périodique dans les algues prélevées près du port militaire de Brest (cf. tableau 2), n'est pas lié aux rejets des installations nucléaires mais aux activités de médecine nucléaire de l'agglomération brestoise.

Toutefois, des traces de cobalt 60 ont pu être mesurées en 2012 et 2013 dans des sédiments marins prélevés près de l'île Longue (0,3 et 0,4 Bq/kg sec). De même près de Brest, deux échantillons, l'un de fucus et l'autre de tourteaux,

prélevés par l'IRSN en 2011 présentent des rapports d'activités isotopiques $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0,09 pour les algues et 0,45 pour les crustacés, supérieurs, voire très supérieurs à celui caractéristique des retombées des essais d'armes nucléaires.

Enfin, les résultats associés aux prélèvements terrestres (lait de vache, herbe, légumes, fruits, feuilles d'arbres) effectués à proximité des ports militaires de la Marine nationale, sont globalement inférieurs aux seuils de décision. Les seules valeurs mesurées dans l'environnement terrestre de ces sites relèvent toutes soit de la radioactivité naturelle (^{40}K , ^7Be ...), soit de la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl ou de celles des essais d'armes nucléaires (^{137}Cs ...).

TABLEAU 2 / ACTIVITÉS EN IODE 131 MESURÉES DANS DES PRÉLÈVEMENTS DE FUCUS (ALGUES) RÉALISÉS À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE BREST (Bq/kg sec) ET AYANT POUR ORIGINE LES SERVICES DE MÉDECINE NUCLÉAIRE DE L'AGGLOMÉRATION BRESTOISE

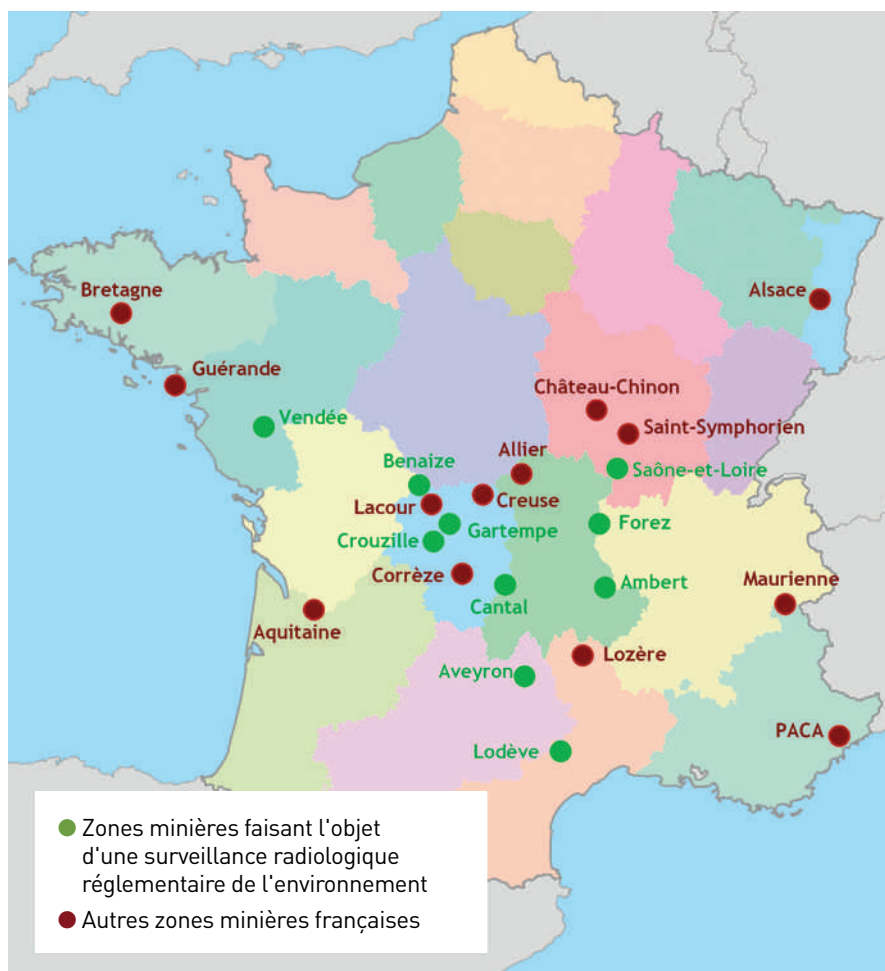
Date de prélèvement	Site de prélèvement	Espèce	Valeurs
09/01/2012	Plougastel Daoulas	Fucus	0,6
05/07/2012	Plougastel Daoulas	Fucus	2,2
27/03/2013	Brest	Fucus	1,7
28/07/2014	Plougastel Daoulas	Fucus	0,9

3.6. LES ANCIENS SITES MINIERS

L'exploitation industrielle de l'uranium en France a duré près de 50 ans. Bon nombre des anciens sites miniers (cf. figure 1) sont aujourd'hui sous la responsabilité d'Areva. 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. L'ensemble des données disponibles est accessible *via* une interface cartographique sur le site Internet de l'IRSN (<https://mimausabdd.irsn.fr/>).

FIGURE 1 / LOCALISATION DES SITES MINIERS FRANÇAIS (PROGRAMME MIMAUSA)



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, environ 230 sites répartis sur 25 départements. Leur taille ainsi que les quantités de minerais 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.

Plan de surveillance

Les anciens sites miniers ont fait l'objet d'une réhabilitation. Les stockages de résidus de traitement du minerai, au nombre de 17, sont soumis à la réglementation concernant les Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Les autres sites sont réglementés par le code minier. Les eaux issues de certains sites miniers et stockages de résidus peuvent nécessiter un traitement avant leur rejet dans 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 pouvant présenter 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 et de certains sites miniers 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 (dans l'air notamment) sont imposés par arrêté préfectoral pour chacun des sites de stockage et pour certains sites miniers. La surveillance porte sur l'uranium 238 et ses descendants tels que le radium 226 qui sont des émetteurs alpha. La mesure de l'indice alpha global (cf. chapitre 1) donne une indication de l'activité de l'ensemble des émetteurs alpha présents dans l'échantillon analysé.

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 les 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 sites miniers parmi les plus importants en termes de tonnage d'uranium extrait ou de résidus de minerais stockés.

TABLEAU 1 / RÉSULTATS DE LA SURVEILLANCE DES SITES MINIERES, ACTIVITÉS MOYENNES DANS LES PRÉLÈVEMENTS D'EAU ENTRE 2011 ET 2014

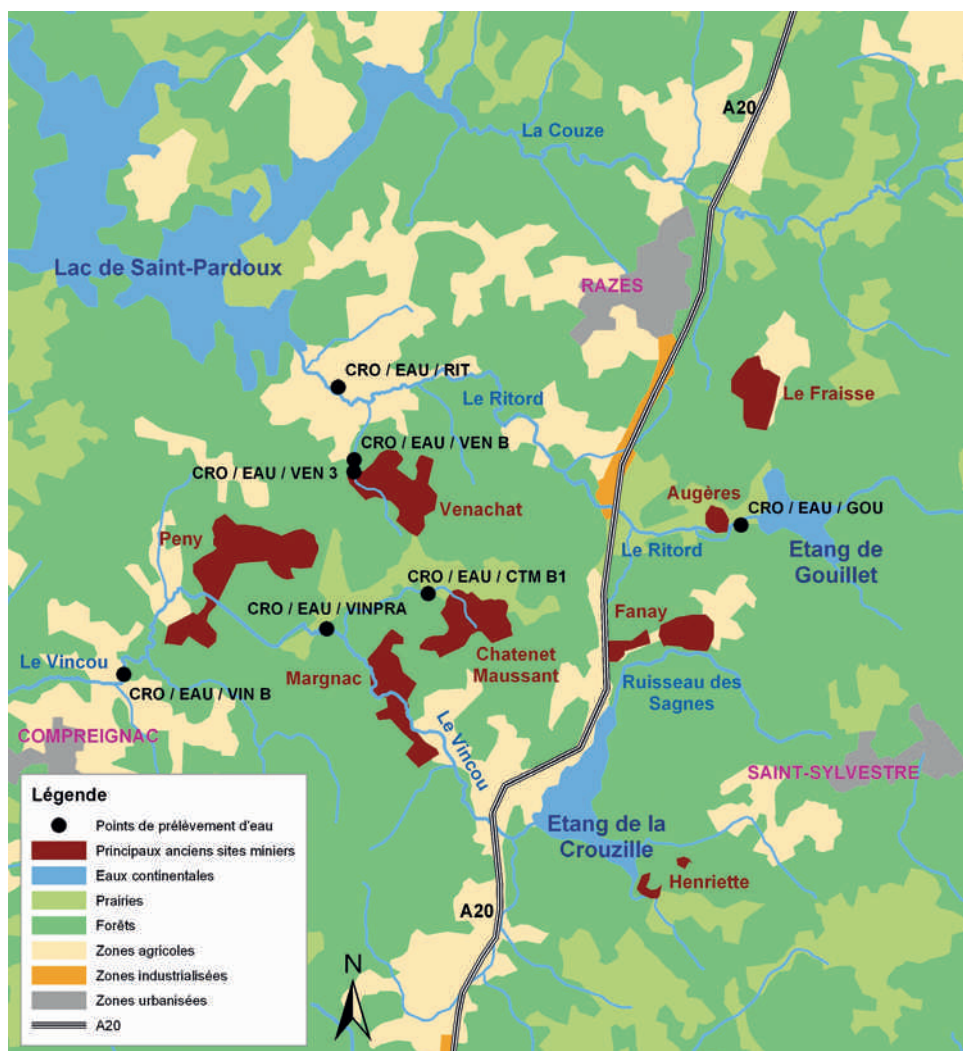
Sites miniers	Prélèvement (référence)	²²⁶ Ra (Bq/L)	²³⁸ U (μBq/L)	Alpha global
La Crouzille	Le Vincou (VIN-B)	0,15	19	nm
Vénachat	Vénachat aval (VENB)	0,11	11	0,73
	Ritord (RIT)	0,05	7,4	0,25
Bessines	Bellezane (BZN-B)	0,05	43	nm
	Gartempe (SIB-B)	0,03	3,6	nm
Saône et Loire	Gueugnon (RAM)	0,03	3,9	nm
	Bauzot (FOSSE)	0,52	7 760	nm
Ecarpière	La Moine aval site	< 0,01	2,7	0,06

Le Tableau 1 présente les activités moyennes du radium 226 et de l'indice alpha global, ainsi que la concentration en uranium 238, mesurées sur la période 2013-2014 au niveau de points de prélèvements représentatifs des sites miniers.

Sites de la Crouzille (Haute-Vienne)

En aval de l'étang de la Crouzille, l'IRSN réalise des prélèvements d'eau dans le Vincou depuis 1966. Ces prélèvements ont permis un suivi historique de la radioactivité pendant les différentes phases de vie des mines.

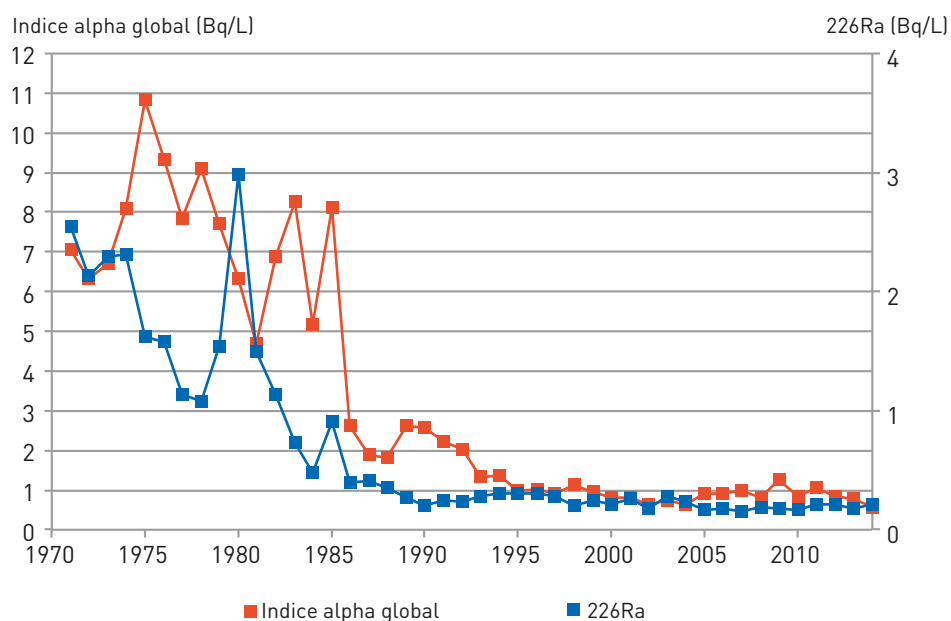
FIGURE 2 / PRINCIPALES RIVIÈRES ET SITES MINIERS DES BASSINS VERSANTS DU VINCOU ET DU RITORD



Les phases d'exploitation puis de mise sous surveillance du site sont visibles au travers de l'activité alpha globale et du radium 226 de l'eau prélevée dans le Vincou. Pendant la période d'exploitation des sites miniers (1948-1995), l'activité alpha globale annuelle moyenne a varié entre 1 et 11 Bq/L en fonction de l'activité industrielle des sites et de l'amélioration

des techniques de traitement des effluents. La valeur maximale mesurée est de 33 Bq/L en juin 1978. Depuis la mise à l'arrêt de l'exploitation minière en 1995, l'activité alpha globale annuelle moyenne n'a pas dépassé 1,13 Bq/L et décroît régulièrement pour atteindre 0,6 Bq/L en 2014. L'activité en radium 226 est proche de 0,12 Bq/L en 2014.

FIGURE 3 / INDICES ALPHA GLOBAL ET ACTIVITÉS DU RADIUM 226 DANS L'EAU EN AVAL DES SITES MINIERS DU BASSIN VERSANT DU VINCOU (Bq/L)



Ces observations sont conformes à celles obtenues sur les eaux du Vincou en aval de l'étang de la Crouzille (activité en radium 226 de 0,09 Bq/L sur la période 2011-2014). La teneur maximale en uranium 238 dans les eaux du Vincou en aval de tous les sites miniers (point VINB - cf. figure 3) est de 19 µg/L. Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles que l'on observe généralement dans des eaux de surface, hors influence minière, en contexte géologique similaire.

Le Vénachat (bassin versant du Ritord)

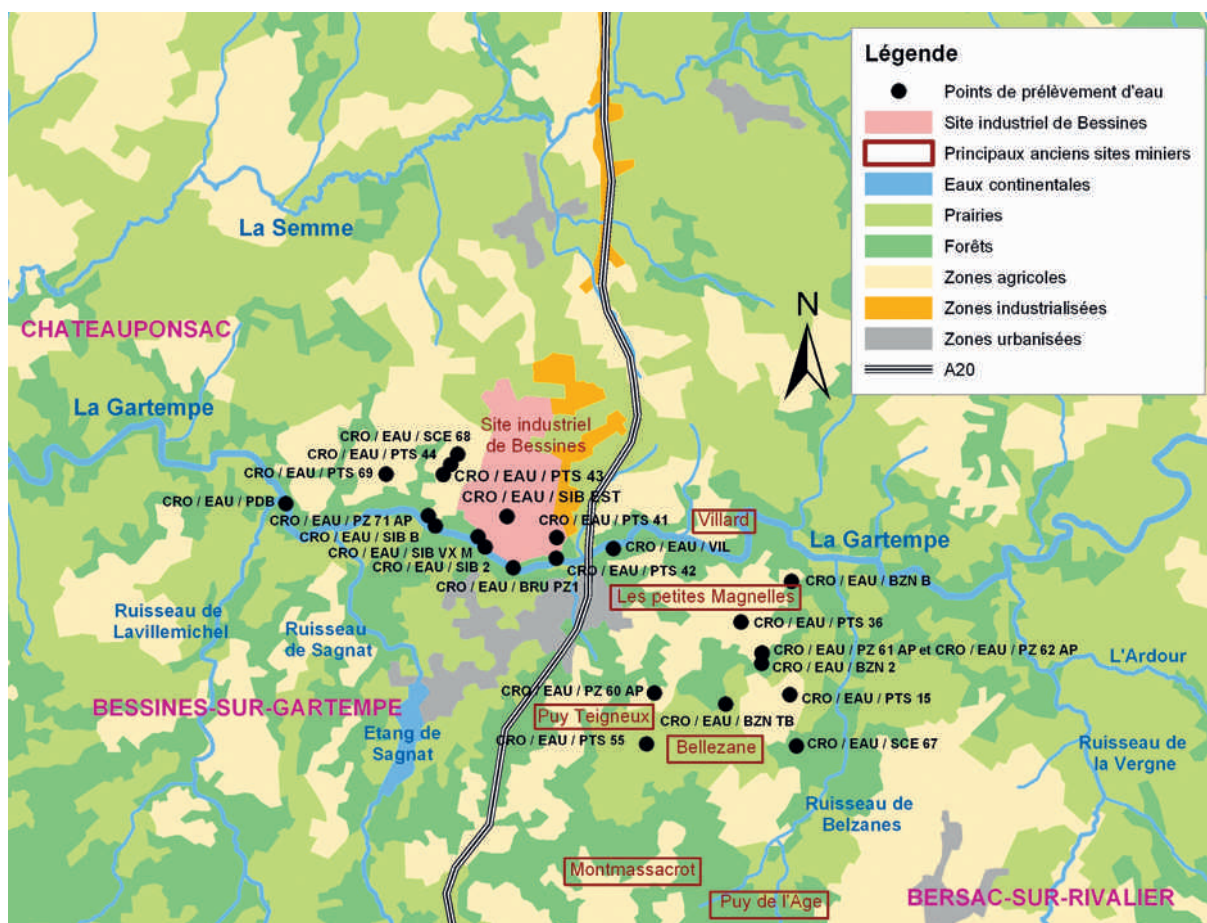
Le marquage radiologique des sites miniers est observé dans les eaux rejoignant le milieu naturel en aval immédiat du site minier de Vénachat (0,14 Bq/L en radium 226 et 11 µg/L en uranium 238 au point VENB), l'activité maximale alpha globale mesurée en 2010 au point VENB étant de 0,74 Bq/L. Dans le Ritord, le marquage décroît (0,05 Bq/L en radium 226 et 7,4 µg/L en uranium 238 au point RIT).

Sites de Bessines (bassin-versant de La Gartempe)

Les rejets des sites de stockage de résidus de minerais d'uranium (Le Brugeaud et Lavaugrasse sur le site industriel de Bessines, Bellezane, Montmassacrot) dont les eaux font l'objet d'un traitement d'insolubilisation du radium, ont des concentrations en radium 226 faibles (de l'ordre de 0,1 Bq/L). Les teneurs en uranium 238 dans les eaux de surface prélevées dans le ruisseau récepteur en aval du site de Bellezane (point BZN B) sont de l'ordre de 43 µg/L.

Les activités en radium 226 et en uranium mesurées dans les eaux de la Gartempe en amont (point VIL) et en aval (point SIB B) du site industriel de Bessines sont représentatives du bruit de fond naturel. L'impact de ce site ainsi que des sites miniers de ce bassin versant sur les eaux de la Gartempe est donc difficilement quantifiable en raison de la dilution des rejets (le débit moyen annuel de la Gartempe est d'environ 30 000 m³/h en amont des sites miniers).

FIGURE 4 / PRINCIPALES RIVIÈRES ET SITES MINIERS DU BASSIN VERSANT DE LA GARTEMPE ET LOCALISATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT AREVA/IRSN



3.7. SYNTHÈSE DES ÉVALUATIONS DOSIMÉTRIQUES

Sur les 36 sites français métropolitains où sont exploitées des installations nucléaires de base, 29 ont pu faire l'objet d'évaluations dosimétriques basées sur des résultats de mesure radiologiques dans leur environnement. Ces mesures ont été acquises, soit par les exploitants nucléaires dans le cadre de la surveillance réglementaire ou lors d'études supplémentaires dont ils sont commanditaires, soit par l'IRSN dans le cadre de sa mission de surveillance radiologique de l'environnement. Le tableau 1 présente de manière synthétique les estimations de doses dues aux rejets des installations et susceptibles d'être reçues par la population située autour de ces sites. Ces estimations sont présentées par radionucléides et par voies d'exposition. Toutes les personnes résidant à proximité d'un de ces sites nucléaires sont susceptibles d'être concernées par les expositions aux radionucléides mesurés dans l'air et provenant des rejets atmosphériques : exposition externe au krypton 85 dans l'air pour les personnes résidant autour de La Hague, inhalation de poussières d'uranium pour les sites de Malvési, du Tricastin ou de Romans-sur-Isère, inhalation ou transfert cutané du tritium autour des sites de Marcoule, Valduc, Bruyères-le-Châtel. Cette exposition varie suivant la distance au site, les doses indiquées correspondant le plus souvent au cas le plus pénalisant (proximité immédiate). En revanche, les doses liées à l'incorporation de radionucléides par ingestion de denrées présentant un niveau mesurable de radionucléides (^{14}C , ^{129}I , ^{60}Co , plutonium et américium autour de La Hague, ^{14}C et ^3H autour des CNPE, ^3H autour de Marcoule, Valduc, Bruyères-le-Châtel et Creys) ne peuvent être reçues que par les personnes consommant les denrées concernées. Ces doses estimées sont alors proportionnelles aux quantités consommées.

À noter que dans le cas des CNPE, les doses par ingestion d'eau (^3H) ou de poissons d'eau douce (^{14}C) ne peuvent concerner que les personnes résidant à proximité d'un CNPE situé au bord d'un fleuve. Inversement, les CNPE de la Manche sont seuls concernés par la consommation de denrées marines pêchées à proximité. Dans le cas particulier du CNPE de Flamanville, une personne consommant des denrées marines issues de la pêche locale serait également exposée, mais dans une moindre mesure, aux rejets liquides provenant du site de La Hague en raison de sa proximité. Enfin, une personne consommant de l'eau ou des poissons provenant des grands fleuves recevant des rejets d'INB (Rhône, Garonne, Loire, Meuse, Seine, Rhin et Moselle) peut-être concernée même si elle se trouve loin en aval d'une ou plusieurs installations nucléaires. À l'aval des fleuves sur lesquels sont implantées plusieurs installations (Loire, Rhône), les rejets de radionucléides solubles (tritium et iode notamment) se cumulent après dilution dans la masse d'eau et se retrouvent quasi intégralement dans l'eau filtrée ; les autres radionucléides (cobalts...) sont plus ou moins fixés sur les matières en suspension qui sont arrêtées par la filtration du traitement de potabilisation.

Les doses susceptibles d'être reçues par la population résidant autour des installations nucléaires françaises, estimées à partir des résultats de mesures issues des différents programmes de surveillance radiologique de l'environnement, sont faibles : de moins de 0,1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ à 6 $\mu\text{Sv}/\text{an}^*$, soit 100 à 10 000 fois plus faibles que la limite d'exposition du public fixée à 1 mSv/an (1 000 $\mu\text{Sv}/\text{an}$). Elles sont également très faibles au regard des doses liées à la radioactivité naturelle également fournies dans le tableau 1.

Ces doses sont en bon accord avec celles estimées par calcul (modélisation de la dispersion et des transferts) par les exploitants des sites nucléaires, à partir des activités réellement rejetées.

*Si l'on cumule les différentes voies d'exposition potentielles du tableau 1 dans le cas de La Hague.

TABLEAU 1 / DOSES EN $\mu\text{Sv}/\text{an}$ POTENTIELLEMENT REÇUES PAR LES POPULATIONS RÉSIDANT À PROXIMITÉ DES SITES NUCLÉAIRES, ÉVALUÉES À PARTIR DE RÉSULTATS DE MESURES ENVIRONNEMENTALES ET IMPUTABLES AUX REJETS DE CHACUN DE CES SITES. DOSES DUES À LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE EN FRANCE. RADIONUCLÉIDES ET/OU VOIES D'EXPOSITION CONCERNÉS

Sites	Doses $\mu\text{Sv}/\text{an}$	Contributeurs majeurs
La Hague	0,6 à 3,5	^{85}Kr – exposition externe
	0,7	^{14}C – ingestion de denrées terrestres et marines
	1,1	^{129}I – ingestion de denrées terrestres et marines
	0,62	^{60}Co , plutonium et ^{241}Am – ingestion de denrées marines
Malvési	2	Uranium – inhalation
	0,4	Uranium – ingestion de légumes
Tricastin	0,05	Uranium – Inhalation
	0,003	Uranium – ingestion ponctuelle d'un litre d'eau
Roman/Isère	0,5	Uranium – inhalation
Marcoule	0,28	Tritium – ingestion d'eau de boisson et de végétaux
	0,12	Tritium – inhalation et percutanée
Saclay	0,28	Tritium – ingestion d'eau de boisson
	1,4	^{14}C – ingestion de poissons de l'Étang Neuf
Grenoble	0,14	Tritium – inhalation et percutanée
Bruyères-le-Châtel	0,14	Tritium – inhalation et percutanée
Valduc	0,39	Tritium – ingestion (eau, végétaux), inhalation et percutané
Sites des CNPE	0,1	^{14}C – ingestion de denrées terrestres
	0,12	^{14}C – ingestion de poisson d'eau douce (CNPE fluviaux)
	0,01 à 0,7	Tritium – ingestion d'eau de boisson (CNPE fluviaux)
	0,08	$^{110\text{m}}\text{Ag}$ – Ingestion de poisson de mer (CNPE marins de la Manche)
	0,0004	Divers radionucléides (^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{58}Co ...) – inhalation et exposition externe à l'air
Creys	< 0,07	Tritium – inhalation et percutanée
Aval du Rhône (toutes installations nucléaires rhodaniennes)	0,06	Divers radionucléides* – ingestion d'eau du Rhône
	0,4	^{14}C – ingestion de poisson de l'aval du Rhône
Radioactivité naturelle	310	Exposition au rayonnement cosmique
	550	Voyageur aérien fréquent
	360 – 1100	Exposition au rayonnement tellurique
	380 – 2500	Ingestion de radionucléides naturels (maximum : gros consommateurs de fruits de mer)
	10	Consommation de 200g de moules (^{210}Po essentiellement)
	540 – 3150	Inhalation de radon (max = Lozère, Cantal...)
	300	Gros fumeur

*Cette dose est calculée sur la base des activités de tous les radionucléides artificiels présents dans l'eau du Rhône sous forme dissoute et mesurées par la station SORA (Station Observatoire du Rhône en Arles) de l'IRSN, après déduction du bruit de fond radiologique. 80 % de cette dose sont dus aux rejets tritiés des installations nucléaires rhodaniennes, 17 % aux rejets de strontium 90 et moins de 3 % proviennent des autres radionucléides (iode 131 des rejets hospitaliers et cobalt 60 principalement).

Contrairement aux estimations calculatoires effectués par les exploitants qui prennent en compte toutes les voies d'exposition du public et tous les radionucléides rejetés, les mesures environnementales ne permettent d'évaluer que les expositions prépondérantes qui résultent d'un marquage radiologique mesurable dans l'environnement. Pour certains sites comme Marcoule, Valduc, Bruyères-le-Châtel ou Creys, les doses dues au seul tritium, estimées à partir des mesures réalisées dans l'environnement, représentent près de 100 % de la dose totale calculée pour ces sites toutes voies d'exposition et tous radionucléides considérés. Dans le cas de La Hague ou des CNPE, les doses présentées dans le tableau 1 représentent plus de 70 % de cette dose totale potentiellement imputable au site. Enfin, dans le cas du Tricastin, l'inhalation de poussière d'uranium représente près de 50 % de la dose calculée par l'exploitant (qui prend en compte toutes les expositions potentielles aux radionucléides rejetés par les installations du site).

La connaissance de la radioactivité environnementale fondée sur les différents programmes de surveillance de l'environnement des sites nucléaires français, permet donc d'estimer l'essentiel des doses susceptibles d'être reçues par la population riveraine. Elle fournit d'autre part un élément de validation des calculs effectués par les exploitants. Cette connaissance n'est toutefois pas seulement issue de la surveillance réglementaire. Par exemple, les mesures de carbone 14 dans les poissons fluviaux, ainsi que celles de ^{110m}Ag et de ^{60}Co dans les denrées marines de la Manche proviennent de programmes supplémentaires financés par EDF. De même, la connaissance des activités en uranium de l'air autour de Malvési résulte d'une étude en partenariat entre l'IRSN et AREVA, celle autour du Tricastin d'une étude ponctuelle menée par l'IRSN.

Enfin, en l'absence d'une influence de leurs rejets sur leur environnement, quantifiable au travers des mesures, les sites de la Marine nationale (Cherbourg, Toulon, Brest), du CEA de Fontenay-aux-Roses et Cadarache, ainsi que l'ANDRA de l'Aube et de Morvilliers, n'ont pas pu faire l'objet d'une évaluation dosimétrique sur la base de mesures environnementales. Les rejets de ces sites sont plus faibles que ceux des installations mentionnées dans le tableau 1 et les doses estimées par les exploitants toutes voies d'atteinte et radionucléides confondus, sont inférieures, voire très inférieures à $0,1 \mu\text{Sv}/\text{an}$ (à l'exception du site de Cadarache pour lequel la dose de $1,5 \mu\text{Sv}/\text{an}$ estimée par le CEA est principalement due à l'émanation additionnelle de radon dont les mesures ne sont pas disponibles dans le RNM).



© IRSN

Prélèvement de sédiments



© Marine nationale



04

COMPRENDRE LA RADIOACTIVITÉ ET LES EXPOSITIONS DES PERSONNES QU'ELLE ENGENDRE

Les radionucléides	222
Les rayonnements	223
L'activité : les becquerels (Bq)	223
La période radioactive	224
Les modes d'exposition à la radioactivité environnementale	224
La dose : le Sievert (Sv)	226
La radioprotection	229

04

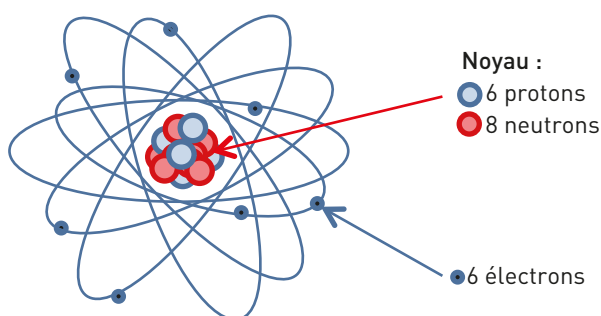
COMPRENDRE LA RADIOACTIVITÉ ET LES EXPOSITIONS DES PERSONNES QU'ELLE ENGENDRE

Les radionucléides

La matière est constituée de molécules qui sont des combinaisons d'atomes de différents éléments chimiques : atomes de carbone, d'hydrogène, de potassium, de calcium, de fer, de plomb, d'uranium, etc. Un atome est composé d'un noyau central constitué notamment de protons et de neutrons, ainsi que d'un nuage périphérique composé d'électrons (cf. figure 1). Certains noyaux atomiques sont instables, radioactifs, et se transforment spontanément en d'autres noyaux : on dit qu'ils se désintègrent.

Chacun des éléments chimiques peut présenter des noyaux différents dont certains sont radioactifs ; ce sont des radionucléides (ou isotopes radioactifs). L'hydrogène a un radionucléide : le tritium. Parmi les radionucléides du carbone figure notamment le carbone 14. Le césium 134 et le césium 137 sont 2 des 15 radionucléides connus du césium. Certains éléments chimiques très lourds comme l'uranium ou le plutonium n'ont aucun noyau stable, seulement des noyaux radioactifs.

FIGURE 1 / REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE D'UN ATOME DE CARBONE 14



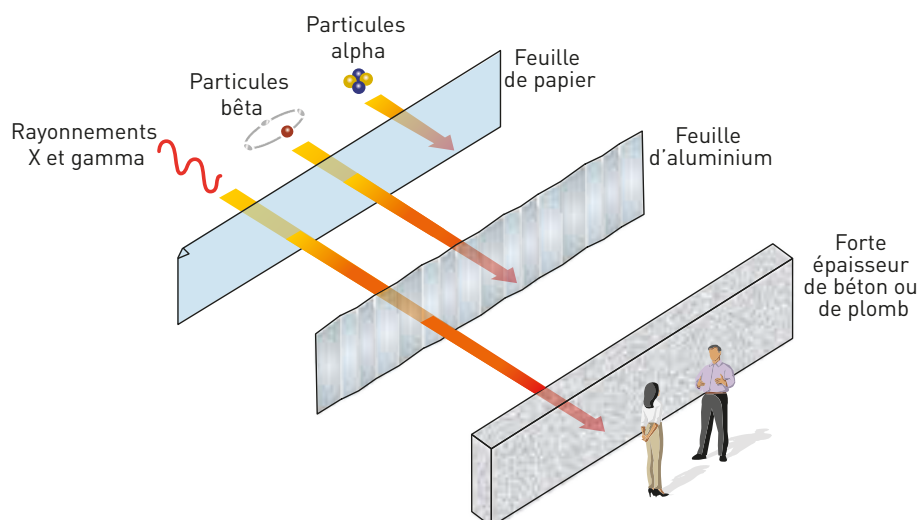
Les rayonnements

Lorsqu'un atome se désintègre il peut émettre différents types de rayonnements. Ces rayonnements sont susceptibles d'arracher des électrons aux atomes de la matière qui les reçoit et donc d'ioniser cette matière. C'est pourquoi ces rayonnements sont dits « ionisants ».

Les principaux rayonnements ionisants issus de la désintégration des radionucléides sont (cf. figure 2 et tableau 1) :

- les rayonnements alpha constitués par un flux de noyaux d'hélium (formés de deux protons et de deux neutrons) ; ils peuvent être arrêtés par une simple feuille de papier ;
- les rayonnements bêta, constitués par un flux d'électrons, ils peuvent être arrêtés par une feuille d'aluminium ;
- les ondes électromagnétiques X et gamma ; les plus énergétiques ne sont arrêtées que par de grosses épaisseurs de plomb ou de béton.

FIGURE 2 / PARCOURS DES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENT



L'activité : les becquerels (Bq)

L'activité d'un radionucléide est le nombre de désintégration qu'il produit par seconde (1 Bq = 1 désintégration par seconde). Le nombre de désintégration par seconde étant proportionnel au nombre d'atomes radioactifs, l'activité d'un radionucléide correspond à une quantité de ce radionucléide. Pour quantifier les rejets radioactifs d'une installation nucléaire, le becquerel étant une unité très petite, on utilise des multiples : kilo-becquerel kBq (= 1 000 Bq), méga-becquerel MBq (= 1 000 000 Bq), giga-becquerel GBq (= 1000 MBq), téra-becquerel TBq (= 1000 GBq).

Dans l'environnement, l'activité est souvent rapportée à une masse ou un volume. L'activité volumique (Bq/L ou Bq/m³) ou l'activité massique

(Bq/kg) d'un radionucléide dans un échantillon de matière est une façon d'exprimer la teneur (ou la concentration) de ce radionucléide dans l'échantillon. Les activités dans l'environnement sont souvent très faibles et on utilise des sous-multiples : par exemple, milli-becquerel par kilogramme mBq/kg (= 0,001 Bq/kg), micro-becquerel par mètre cube $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (0,000001 Bq/m³).

En mesurant l'activité des radionucléides grâce aux rayonnements qu'ils émettent, il est possible de détecter des quantités (masses) infimes de matière radioactive. Ainsi, une activité massique de 600 becquerels de césium 137 par kilogramme correspond à une teneur en césium de 0,00000086 grammes (0,86 microgrammes) de césium 137 par tonne.

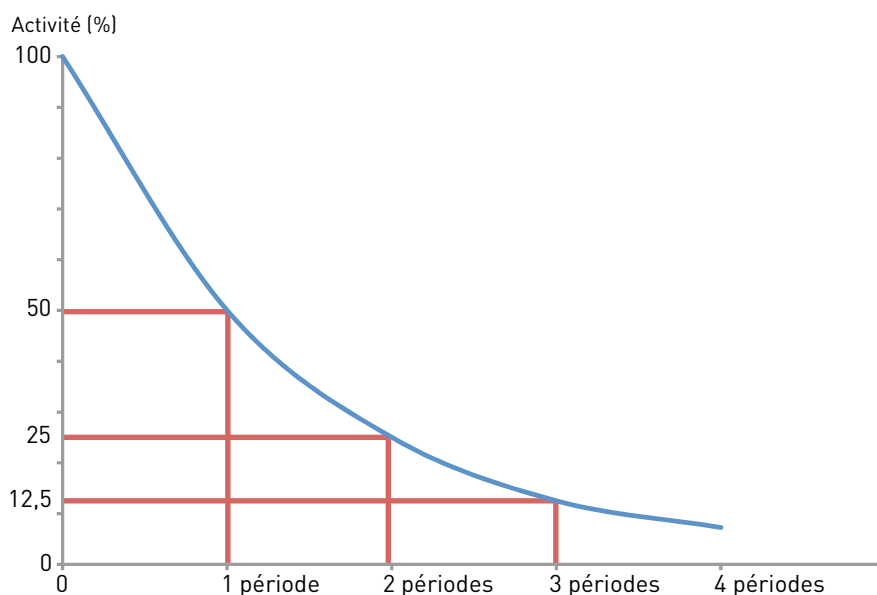
La période radioactive

La désintégration d'un atome entraîne soit la formation d'un autre atome radioactif (d'un autre radionucléide), soit la production d'un atome stable (non radioactif). Elle entraîne donc la diminution de l'activité du radionucléide considéré.

La période radioactive (ou demi-vie) d'un radionucléide est le temps nécessaire pour que l'activité (le nombre de becquerels) d'un radionucléide soit réduit de moitié. (cf. figure 3 et tableau 1).

Elle varie suivant le radionucléide d'une fraction de seconde à des milliards d'années. L'uranium 238 a une demi-vie de près de 4,5 milliards d'années. C'est cette longue période qui explique qu'on en trouve encore sur Terre à l'état naturel. La période de l'uranium 235 est de près de 700 millions d'années ; c'est ce qui explique que, comparativement à l'uranium 238, on en trouve relativement peu (il ne constitue que 0,7 % de l'uranium naturel).

FIGURE 3 / REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE LA DÉCROISSANCE RADIOACTIVE



Les modes d'exposition à la radioactivité environnementale

Une personne peut être exposée de plusieurs manières à la radioactivité présente dans l'environnement.

Si la personne est exposée à une source de rayonnement qui lui est extérieure, l'air ou le sol par exemple, l'exposition est externe. Cette exposition concerne essentiellement les radionucléides émetteurs gamma ou X car ces rayonnements ont un long parcours dans l'air et peuvent pénétrer profondément dans

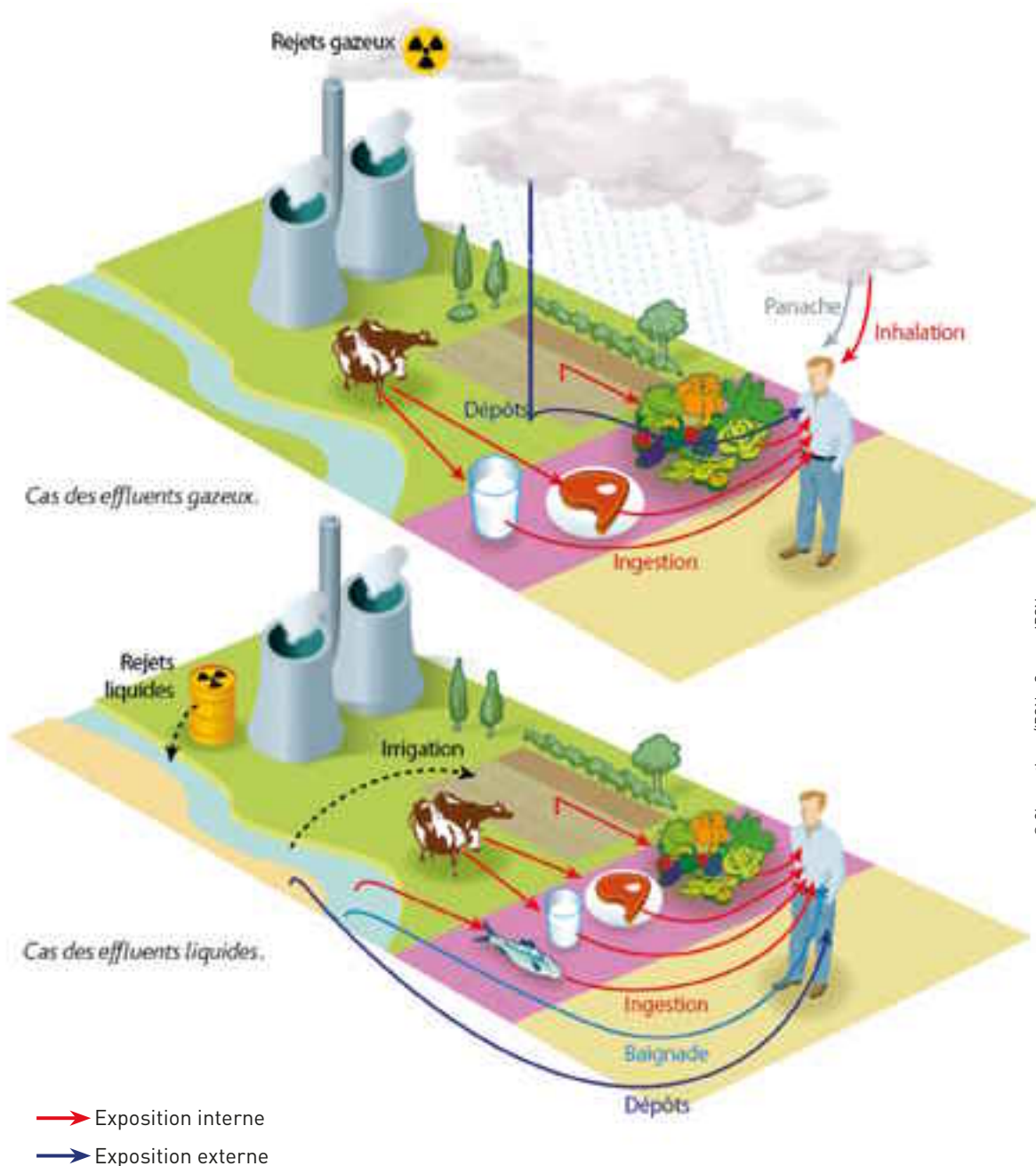
l'organisme (cf. figure 2). Elle est faible pour les radionucléides émetteurs alpha purs (sans émission gamma comme ^{238}Pu ou $^{239+240}\text{Pu}$ par exemple) ou pour les émetteurs bêta purs de faible énergie (comme le tritium et le carbone 14) qui sont arrêtés par la peau. L'exposition externe diminue très vite avec la distance par rapport à la source et cesse si l'on s'en écarte suffisamment.

Si le radionucléide pénètre dans l'organisme par inhalation ou ingestion, l'exposition est interne. Cette exposition va persister jusqu'à ce que le

radionucléide disparaît par décroissance radioactive ou soit éliminé par l'organisme. Cette élimination peut être très rapide (cas du tritium éliminé avec l'eau) ou très longue (cas du plutonium qui se fixe notamment dans les os).

Cette exposition est particulièrement pénalisante pour les émetteurs alpha dont le rayonnement très énergétique percute les cellules des tissus vivants situées à proximité immédiate de l'endroit du corps où ils se sont fixés.

FIGURE 4 / MODE D'EXPOSITION D'UNE PERSONNE À LA RADIOACTIVITÉ ENVIRONNEMENTALE



La dose : le Sievert (Sv)

En y cédant leur énergie les rayonnements ionisants endommagent les tissus de l'organisme. Ces dommages et leurs conséquences dépendent de la nature du rayonnement, de son énergie et du devenir du radionucléide lorsqu'il est ingéré ou inhalé.

Par ailleurs, les différents organes sont plus ou moins sensibles aux rayonnements. De plus, suivant les parties de l'organisme touchées par les rayonnements, les effets sont différents. L'estimation de la dose efficace permet de quantifier et de comparer les différentes expositions auxquelles peuvent être soumis une personne en prenant en compte les spécificités des radionucléides, de leur rayonnement ainsi que des organes exposés. La dose efficace s'exprime en Sievert (Sv). Pour les expositions qui résultent de la radioactivité environnementale, cette unité est

très grande et on utilise des sous-multiples : le milliSievert ($1 \text{ mSv} = 0,001 \text{ Sv}$) ou le microSievert ($1 \mu\text{Sv} = 0,000\,001 \text{ Sv}$). Dans ce bilan radiologique, les doses efficaces sont estimées pour l'individu adulte et pour une durée d'exposition de un an (mSv/an ou $\mu\text{Sv/an}$).

Le facteur de dose permet d'estimer la dose en Sievert à partir des activités environnementales mesurées (Bq/kg dans les denrées, Bq/m^2 dans les sols et Bq/m^3 dans l'air notamment). Le facteur de dose qui permet d'estimer la dose consécutive à l'ingestion d'un radionucléide est exprimée en Sv/Bq ingéré ; celle pour estimer la dose par inhalation en Sv/Bq inhalé ; et l'exposition externe en Sv/h par Bq/m^3 si le radionucléide est dans l'air ou en Sv/h par Bq/m^2 s'il est sur ou dans le sol. La figure 5 montre que les facteurs de dose sont très différents suivant le radionucléide et le mode d'exposition.

LES EFFETS DES RAYONNEMENTS SUR LA SANTÉ

Les rayonnements peuvent entraîner des dommages sur les cellules des organes qui y sont exposés. En cas d'irradiation très importante, la mort massive de cellules peut entraîner des effets rapides et certains : brûlure plus ou moins importante, nécrose, baisse des globules blancs, nausée et dans le cas extrême, le décès de l'individu. Les activités présentes dans l'environnement

ne peuvent en aucun cas conduire à ce genre de conséquences. Les expositions à la radioactivité environnementale sont de l'ordre de mille à un million de fois plus faibles que celles susceptibles de produire les effets cités précédemment. Elles peuvent être à l'origine, de manière aléatoire, de pathologies qui apparaissent des années, voire des décennies plus tard, essentiellement des cancers. Ces conséquences sont assimilables à celles qui peuvent résulter du tabagisme ou de l'apparition de cancer de la peau après des expositions répétées au soleil.

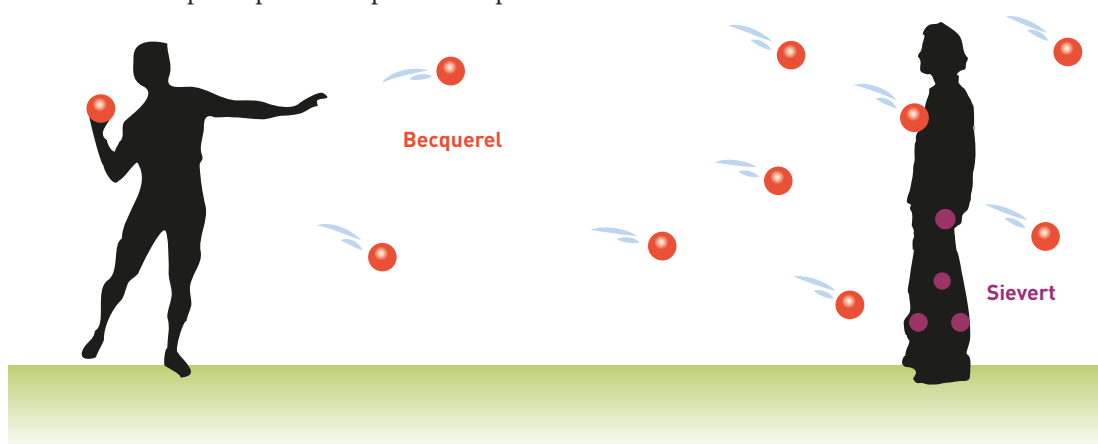


TABLEAU 1 / CARACTÉRISTIQUES DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES MESURÉS DANS L'ENVIRONNEMENT

Radionucléide	Période radioactive (an)	Rayonnement		Origine
		Nature	Énergie	
³ H	12,3	bêta	très faible énergie	1, 2 et 3
¹⁴ C	5 730	bêta	faible énergie	1, 2 et 3
⁹⁰ Sr-Y	28	bêta	forte énergie	2 et 3
⁴⁰ K	1 260 000 000	bêta et gamma	forte énergie	1
^{110m} Ag	0,68	bêta et gamma	forte énergie	2
¹³⁴ Cs	2,1	bêta et gamma	forte énergie	2
⁶⁰ Co	5,3	bêta et gamma	forte énergie	2
¹³⁷ Cs-mBa	30	bêta et gamma	forte énergie	2, 3 et 4
¹⁰⁶ Ru-Rh	1	bêta et gamma	forte énergie	2
¹²⁹ I	15 700 000	bêta et gamma	faible à moyenne énergie	1 et 2
²²⁶ Ra	1 600	alpha et gamma	forte énergie	1
²¹⁰ Po	0,38	alpha	forte énergie	1
²³⁸ U	4 500 000 000	alpha	forte énergie	1 et 2
²³⁸ Pu	88	alpha	forte énergie	2 et 3
²³⁹ Pu	24 000	alpha	forte énergie	2 et 3

1 : Naturel* / 2 : Rejets des installations nucléaires / 3 : Rémanence des essais d'armes nucléaires* / 4 : Rémanence de l'accident de Tchernobyl*
* Cf. chapitre 2

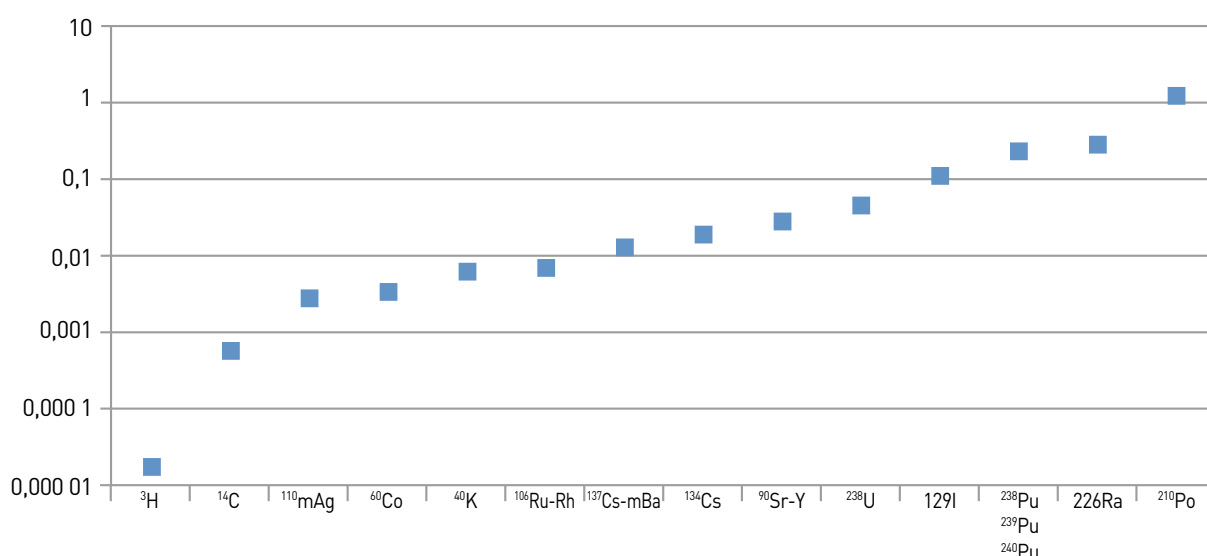
TABLEAU 2 / MODE DE CALCUL DES DOSES PAR EXPOSITIONS EXTERNE ET INTERNE À PARTIR DES ACTIVITÉS ENVIRONNEMENTALES

Exposition externe	=	Activé surfacique ou volumique en Bq/m ² ou Bq/m ³	X	Temps d'exposition en h	X	Coefficient de dose en Sv/h par Bq/m ² ou Sv/h par Bq/m ³
Exposition interne	=	Activé massique ou volumique (air, denrées) en Bq/kg ou Bq/L de denrées et Bq/m ³ d'air	X	Quantité d'air inhalée ou de denrées ingérée m ³ d'air, L ou kg de denrées	X	Coefficient de dose en Sv/Bq inhalé ou ingéré

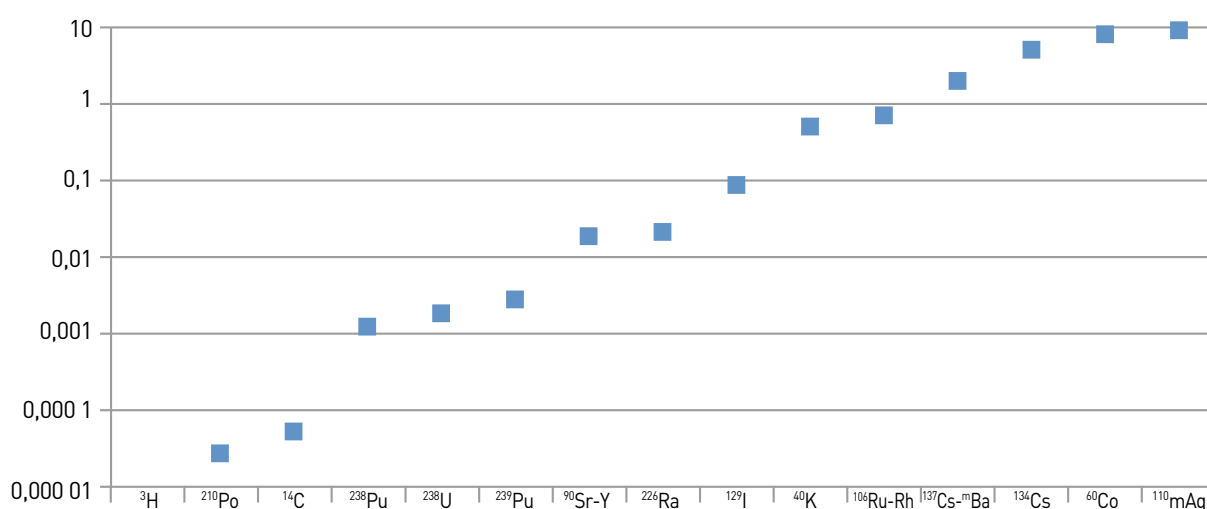
FIGURE 5 / DOSE EFFICACE POUR UNE INGESTION UNITAIRE ($\mu\text{Sv}/\text{Bq}$) ET DÉBIT DE DOSE DANS L'AIR PAR IRRADIATION POUR UNE ACTIVITÉ SURFACIQUE UNITAIRE ($\mu\text{Sv}/\text{heure par MBq}/\text{m}^2$) POUR LES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES MESURÉS DANS L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS

Pour une même activité ingérée ou pour une même activité déposée sur le sol, les doses générées par les radionucléides sont très différentes. Elles dépendent de la nature du rayonnement et de son énergie, ainsi que du devenir du radionucléide dans l'organisme dans le cas de l'ingestion. En raison notamment de son rayonnement bêta de très faible énergie, le tritium est près de 10 millions de fois moins radiotoxique par ingestion que le polonium 210. Il ne produit par ailleurs aucune irradiation externe. De manière générale les radionucléides émetteurs alpha (plutonium, radium, polonium et uranium) sont les plus radiotoxiques par ingestion. En raison de leur rayonnement gamma de forte énergie, l'argent 110m, le cobalt 60, les césiums déposés à la surface du sol sont les plus irradiants dans l'air.

Dose efficace par ingestion unitaire pour un adulte
($\mu\text{Sv}/\text{Bq}$ ingéré)



Débit de dose annuelle dans l'air par irradiation pour une activité surfacique au sol unitaire
($\mu\text{Sv}/\text{heure par MBq}/\text{m}^2$)



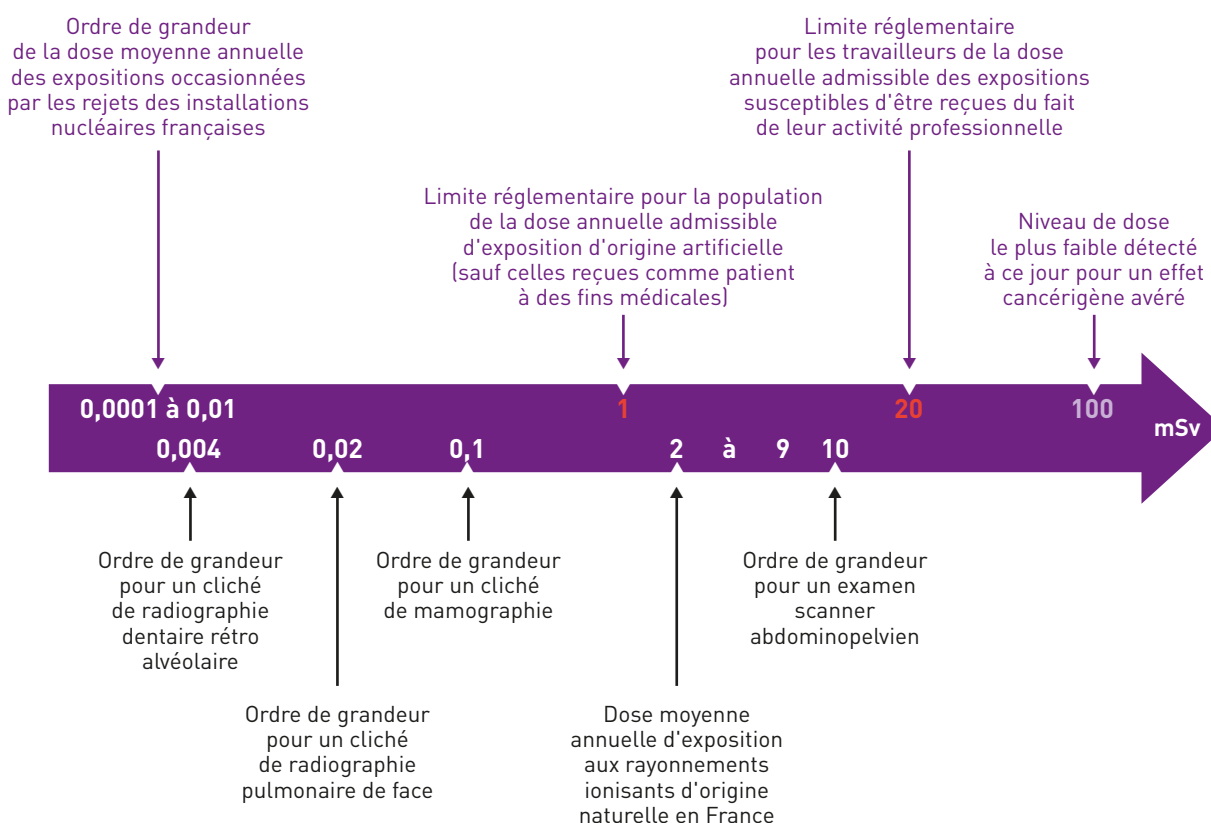
Pour évaluer la dose efficace annuelle potentielle qui résulte de l'ingestion, il faut estimer la quantité de denrées concernées ingérée par an (cf. tableau 2). L'essentiel de l'influence des installations nucléaires étant limité à leur voisinage immédiat, il s'agit d'estimer la part de denrées locales consommées. Les enquêtes alimentaires menées en France montrent que la part de légumes et de fruits locaux peut être très importante (supérieure à 70 %). En revanche la consommation de dérivés céréaliers (pain, pâtes, riz...) produits localement est le plus souvent nulle. En multipliant la quantité de chaque denrée locale consommée annuellement (kg/an) par l'activité de chaque radionucléide mesurée dans chacune d'elle (Bq/kg) on obtient l'activité incorporée annuellement (Bq/an) pour chaque radionucléide. Le facteur de dose permet ensuite d'estimer la dose efficace par ingestion (Sv/an) à partir de cette activité incorporée.

Dans le cas de l'inhalation, il s'agit d'estimer l'activité inhalée par la personne (Bq/an) à partir de l'activité mesurée dans l'air (Bq/m³) en prenant en compte un débit respiratoire moyen (m³/h).

La radioprotection

Le but de la radioprotection est de réduire les risques liés aux rayonnements ionisants en limitant notamment les doses liées aux expositions individuelles. Pour la population, la limite annuelle d'exposition de 1 mSv s'applique à la somme des doses reçues en dehors de la radioactivité naturelle et de l'utilisation médicale des rayonnements ionisants. Les doses calculées dans ce bilan à partir des activités mesurées dans l'environnement sont de l'ordre de 100 à plus de 10 000 fois plus faibles que cette limite.

FIGURE 6 / LIMITES RÉGLEMENTAIRES D'EXPOSITION ET EXEMPLES DE DOSES EFFICACES REÇUES LORS D'EXAMENS MÉDICAUX (mSv)





© Leprieux/IRSN

05

LES SOURCES D'INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ ET LA DIFFUSION DE DONNÉES

5.1. SITES INTERNET ET SUPPORTS D'INFORMATION DU PUBLIC	232
Portail internet du réseau national de mesures (RNM) de la radioactivité de l'environnement	232
Site internet de l'IRSN	233
Sites internet des principaux producteurs de données et des acteurs intéressés	234
Supports d'information de l'autorité de sûreté nucléaire	237
Le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire	237
Rapports « environnement » des installations nucléaires	238
5.2. DIFFUSION D'INFORMATION DANS LE CADRE DE TRAITÉS OU CONVENTIONS INTERNATIONALES	238
La diffusion des données françaises dans le cadre du traité Euratom	238
Les données transmises à la commission OSPAR	239

05

LES SOURCES D'INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ ET LA DIFFUSION DE DONNÉES

L'information du public concernant la radioactivité dans l'environnement est un élément essentiel de la transparence des activités nucléaires. La Loi TSN du 13 juin 2006, intégrée dans le code de l'environnement, précise que « la transparence en matière nucléaire est l'ensemble des dispositions prises pour garantir le droit du public à une information fiable et accessible... ».

L'ASN, l'IRSN et les acteurs du nucléaire en France proposent de nombreux supports d'information pour répondre d'une part à des obligations légales, et d'autre part aux attentes du public.

La diffusion des données de la surveillance radiologique de l'environnement dépasse le cadre national. En application du traité Euratom et dans le cadre des travaux de la commission OSPAR, l'IRSN transmet chaque année les résultats de la surveillance qu'il effectue au titre de ses missions. Ces données font ensuite l'objet d'études et de publications disponibles pour le public *via* différents supports d'information.

5.1. SITES INTERNET ET SUPPORTS D'INFORMATION DU PUBLIC

Portail internet du réseau national de mesures (RNM) de la radioactivité de l'environnement

Le site internet du RNM, lancé le 2 février 2010, est la principale référence concernant la surveillance de la radioactivité dans l'environnement

en offrant notamment un accès centralisé à l'ensemble des résultats de la surveillance environnementale réalisée par l'ensemble des producteurs de données.

La base de données du RNM 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 site propose par ailleurs plusieurs rubriques d'aide à la compréhension de l'expression des résultats de mesures (incertitude, limite de détection et seuil de décision...), des unités de mesure, etc. 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 plus de 17 500 nouveaux résultats de mesures sont ajoutés chaque mois. Le RNM permet ainsi de disposer d'une vision la plus globale possible sur l'ensemble des mesures de radioactivité réalisées dans l'environnement par les différents acteurs impliqués.

Forts d'un retour d'expérience de 5 ans, l'ASN et l'IRSN souhaitent maintenant le faire évoluer vers une information plus claire et accessible au grand public. Ainsi, début 2016, devrait voir le jour un nouveau site, complément du premier qui demeurerait accessible à tous, et qui favoriserait la diffusion des informations et de leur appropriation auprès du public.

FIGURE 1 / PORTAIL RNM



Site internet de l'IRSN

Depuis plusieurs années, l'IRSN poursuit une démarche visant à mieux faire connaître les résultats de ses études sur la radioactivité de l'environnement et de la surveillance de l'environnement, notamment en mettant à disposition de multiples informations sur son site internet.

La base de connaissances dédiée à la « surveillance de l'environnement » est accessible depuis la page d'accueil du site www.irsn.fr : outre des informations générales et pédagogiques sur la radioactivité et l'environnement, elle restitue une partie des résultats de la surveillance diffusés sous forme de rapports (bilans radiologiques, constats radiologiques régionaux, études spécifiques) accessibles par téléchargement ou pour certains directement en ligne.

L'IRSN dispose également d'un site dédié sur lequel est mis à disposition du public l'ensemble des résultats acquis dans le cadre de la mission de surveillance radiologique de l'environnement <http://sws.irsn.fr/sws/mesure/index>.

La 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 Téléray 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 donner 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 40 ans (filtres aérosols notamment).

FIGURE 2 / LE SITE IRSN, BASE DE CONNAISSANCES DÉDIÉE À LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT, EN UN CLIC LA CARTE (À DROITE) DONNE ACCÈS AU SITE DÉDIÉ AUX RÉSULTATS DE LA SURVEILLANCE PAR L'IRSN



Sites internet des principaux producteurs de données et des acteurs intéressés

Tous les acteurs de la mesure de radioactivité dans l'environnement disposent de sites internet permettant au public d'obtenir des informations complémentaires sur leurs activités, leurs

programmes de contrôle, de surveillance ou d'expertise ponctuelle. Certains sites internet permettent en outre la consultation du rapport annuel d'information du public prévu par la loi TSN, qui comporte une rubrique relative à la nature et aux résultats des mesures des rejets radioactifs et non radioactifs des installations nucléaires dans l'environnement.

Sélection de sites internet des principaux exploitants (industriels et organismes de recherche)

CEA

- **Radioactivité**
<http://www.cea.fr/jeunes/themes/la-radioactivite>
- **Carbone 14**
<http://www.cea.fr/jeunes/mediatheque/animations-flash/climat-environnement/le-cycle-du-carbone>
- **Surveillance de l'environnement des sites du CEA**
<http://www.cea.fr/le-cea/actualites/surveillance-de-l-environnement-sur-le-centre-de-114280>

FIGURE 3 / PORTAIL DU CEA SUR LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE SACLAY



EDF

- **Surveillance de l'environnement**
<http://energie.edf.com/nucleaire/environnement/surveillance-de-l-environnement-45713.html>
- **Résultats mensuels de la surveillance dans l'environnement**
<http://energie.edf.com/nucleaire/environnement/resultats-mensuels-de-la-surveillance-45714.html>
- **Ouvrage "Centrales nucléaires et environnement"**
http://energie.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/En_Direct_Centrales/Nucleaire/General/ebookedfbasedef.pdf

FIGURE 4 / PORTAIL EDF SUR LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT



ANDRA

- **Surveillance de l'environnement**
- Site du CSA (Aube)**
<https://www.andra.fr/andra-aube/pages/fr/menu4/le-cires/la-surveillance-de-l-environnement-1101.html>

FIGURE 5 / PORTAIL ANDRA SUR LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE L'AUBE



Site de la Manche

<https://www.andra.fr/andra-manche/pages/fr/menu7/la-surveillance-de-l-environnement-1074.html>

Site de la Meuse/Haute-Marne (Observatoire Pérenne de l'Environnement)

<https://www.andra.fr/andra-manche/pages/fr/menu7/la-surveillance-de-l-environnement-1074.html>

AREVA

- **Surveillance de l'environnement**

Site de La Hague

<http://www.aveva.com/FR/activites-1220/le-programme-de-surveillance-de-l-environnement-aveva-la-hague.html>

Site de Malvési

<http://www.aveva.com/FR/activites-870/la-surveillance-de-l-environnement-de-comurhex-malvesi.html>

Site du Tricastin

<http://www.aveva.com/FR/activites-864/la-surveillance-de-l-environnement-du-site-du-tricastin.html>

FIGURE 6 / PORTAIL DE L'ENVIRONNEMENT AREVA (SITE DU TRICASTIN)



Site FBFC Romans

<http://www.aveva.com/FR/activites-1040/la-surveillance-de-l-environnement-fbfc-romans.html>

Sélection de sites internet de différents acteurs intéressés par la surveillance radiologique de l'environnement

• Organismes internationaux

AEN - Agence pour l'énergie nucléaire

<http://www.nea.fr>

CIPR - Commission internationale de protection radiologique

<http://www.icrp.org>

Commission européenne

http://ec.europa.eu/index_fr.htm

OMS - Organisation mondiale de la santé

<http://www.who.int/fr/>

UNSCEAR - United nations scientific committee on the effects of atomic radiation

<http://www.unscear.org>

CTBT - Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization

<http://www.ctbto.org/>

• ONG, associations et sociétés savantes

ANCCLI : Association Nationale des Comités et Commissions Locales d'Information

Créée le 5 septembre 2000, L'ANCCLI est l'Association Nationale des Comités et Commissions Locales d'Information. Régie par la loi du 1^{er} juillet 1901, elle regroupe 37 Commissions Locales d'Information. En France, chaque installation nucléaire est pourvue d'une Commission Locale d'Information (CLI). La CLI a une double mission : informer la population sur les activités nucléaires et assurer un suivi permanent de l'impact des installations nucléaires.

L'ANCCLI fédère les expériences et les attentes des CLI et porte leurs voix auprès des instances nationales et internationales.

Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO)

<http://www.acro.eu.org/>

CRIIRAD - Commission de recherche et d'information indépendante sur la radioactivité

<http://www.criirad.org>

Réseau sortir du nucléaire

<http://www.sortirdunucleaire.org>

Greenpeace

<http://www.greenpeace.fr>

CEPN - Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire

<http://www.cepn.asso.fr>

SFEN - Société française d'énergie nucléaire

<http://www.sfen.org>

SFRP - Société française de radioprotection

<http://www.sfrp.asso.fr>

SRP - Society of radiological protection

<http://www.srp-uk.org>

WISE-Paris - Service mondial d'information sur l'énergie

<http://www.wise-paris.org>

WNA - World nuclear association

<http://www.world-nuclear.org>

FIGURE 7 / SITE WEB DE L'ANCCLI



Supports d'information de l'autorité de sûreté nucléaire

L'ASN a mis en place une politique d'information fondée sur des supports complémentaires de manière à rendre l'information accessible à ses différents publics. Le site www.asn.fr est le principal outil d'information du public. Il présente l'actualité de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France, et les prises de position de l'ASN dans ses domaines de compétences. Par ailleurs, le site donne accès à une base documentaire sur la vie des installations *via* une navigation simplifiée, un accès aux données amélioré et un téléchargement optimisé des informations ou publications sélectionnées. Depuis 2012, l'ASN a développé sur son site internet une page TV (<http://tv.asn.fr/Environnement>) dédiée à des sujets connexes à la surveillance de l'environnement (*cf.* figure 8)

FIGURE 8 / TV ASN (ENVIRONNEMENT)



Le Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France, publié annuellement, constitue un document de référence qui informe sur l'état des activités contrôlées par l'ASN dans ces deux domaines. L'ASN publie quatre fois par an la revue *Contrôle*, diffusée à plus de 10 000 destinataires en France et à l'étranger.

Ces publications ainsi que les autres supports d'information de l'ASN (la Lettre de l'ASN, les plaquettes et fiches d'information à destination du grand public) sont consultables et téléchargeables sur www.asn.fr. Elles sont également à disposition au Centre d'information et de documentation du public de l'ASN.

Le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire

Créé par le code de l'environnement (article L125-34), le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire est une instance d'information, de concertation et de débat sur les risques liés aux activités nucléaires et l'impact de ces activités sur la santé des personnes, sur l'environnement et sur la sécurité nucléaire. À ce titre, le haut comité peut émettre un avis sur toute question dans ces domaines ainsi que sur les contrôles et l'information qui s'y rapportent. Il peut également se saisir de toute question relative à l'accessibilité de l'information en matière de sécurité nucléaire et proposer toute mesure de nature à garantir ou à améliorer la transparence définie à l'article L. 125-12.

Il peut enfin être saisi par :

- le ministre chargé de la sûreté nucléaire,
- les présidents des commissions compétentes de l'Assemblée nationale et du Sénat,
- le président de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques,
- les présidents des commissions locales d'information,
- les exploitants d'installations nucléaires de base de toute question relative à l'information concernant la sécurité nucléaire et son contrôle.

Le HCTISN est composé de membres nommés pour six ans par décret, au nombre de quatre pour les parlementaires et de six au titre de chacune des autres catégories, ainsi répartis :

- deux députés désignés par l'Assemblée nationale et deux sénateurs désignés par le Sénat ;
- des représentants des commissions locales d'information ;
- des représentants d'associations de protection de l'environnement et d'associations mentionnées à l'article L.1114-1 du code de la santé publique ;
- des représentants des personnes responsables d'activités nucléaires ;
- des représentants d'organisations syndicales de salariés représentatives ;
- des personnalités choisies en raison de leur compétence scientifique, technique, économique ou sociale, ou en matière d'information et de communication, dont trois désignées par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, une par l'Académie des sciences et une par l'Académie des sciences morales et politiques ;

- des représentants de l'Autorité de sûreté nucléaire, des services de l'État concernés et de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

Le président du Haut Comité est nommé par décret parmi les parlementaires, les représentants des commissions locales d'information et les personnalités choisies en raison de leur compétence qui en sont membres.

Rapports « environnement » des installations nucléaires

Les exploitants sont soumis à des obligations légales d'information, soit générales (comme le rapport environnement prévu par le code du commerce pour les sociétés par actions), soit spécifiques au domaine nucléaire.

La loi TSN impose à tout exploitant d'installation nucléaire d'établir chaque année un rapport sur sa situation et les actions qu'il mène, notamment dans le domaine de la surveillance radiologique de l'environnement de son installation. En parallèle, la réglementation impose également aux exploitants la publication d'un rapport annuel de surveillance en application des règles générales relatives aux installations nucléaires de base (arrêté du 7 février 2012). « *L'exploitant établit annuellement un rapport présentant l'impact de son installation durant l'année civile écoulée. Ce rapport caractérise les prélèvements d'eau, les rejets d'effluents, la surveillance de l'environnement et les impacts et nuisances occasionnés. Le rapport est transmis, à l'Autorité de sûreté nucléaire, à la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement, à l'agence régionale de santé, au service chargé de la police de l'eau ainsi qu'à la commission locale d'information.* »

L'ASN procède chaque année à une analyse de ces documents et publie dans son rapport annuel les principales conclusions relatives au traitement des rubriques mentionnées dans la loi, aux éléments stratégiques et à la pédagogie sur la transparence et le droit d'accès à l'information nucléaire (articles 19 et 21 de la loi TSN).

5.2. DIFFUSION D'INFORMATION DANS LE CADRE DE TRAITÉS OU CONVENTIONS INTERNATIONALES

L'action de l'IRSN en matière d'information sur la surveillance de la radioactivité de l'environnement s'opère également au niveau international notamment dans le cadre du traité Euratom et de la Commission pour la protection du milieu marin de l'Atlantique Nord-Est, dite Commission OSPAR.

La diffusion des données françaises dans le cadre du traité Euratom

Chaque année l'IRSN transmet à la Commission européenne, au nom de l'État français, plusieurs milliers de 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 des moyennes horaires des sondes du réseau TELERAY sur la plateforme EURDEP (EUropean Radiological Data Exchange Platform) (cf. figure 9). 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.europa.eu> permet de se connecter aux différentes bases de données de la Commission européenne pour en visualiser les résultats.

FIGURE 9 / PORTAIL EURDEP DE LA COMMISSION EUROPÉENNE



Les données transmises à la commission OSPAR

La mission de la Convention OSPAR est de protéger l'environnement marin de l'Atlantique du Nord-Est, en prévenant et supprimant la pollution, en protégeant l'environnement marin contre les effets néfastes des activités humaines, et en contribuant à l'usage durable des mers.

Cette commission est composée de représentants des gouvernements des 15 parties contractantes (Allemagne, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Irlande, Islande, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, Suède et Suisse) et de la Commission européenne.

« L'objectif stratégique de la Commission OSPAR en ce qui concerne les substances radioactives consiste à prévenir la pollution de la zone maritime par les radiations ionisantes, ceci par des réductions progressives et substantielles des rejets, émissions et pertes de substances radioactives, le but ultime étant de parvenir à des concentrations, dans l'environnement qui soient proches des valeurs

ambiantes dans le cas des substances radioactives présentes à l'état naturel et proches de zéro dans celui des substances radioactives de synthèse. »

L'IRSN est impliqué dans les travaux de la Commission OSPAR et transmet 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 annuelles sont amenées à se poursuivre.

FIGURE 10 / OSPAR





© Leprieux/IRSN



06

ANNEXES

6.1. PRÉSENTATION ET EXPLOITATION DES RÉSULTATS	242
6.2. GLOSSAIRE	244
6.3. COMITÉ ÉDITORIAL	252

6.1. PRÉSENTATION ET EXPLOITATION DES RÉSULTATS

Les résultats exploités dans ce bilan, sous forme de graphiques ou de tableaux synthétiques, concernent la période du 1^{er} juin 2011 au 31 décembre 2014, et sont issus des données du RNM, de l'IRSN, ainsi que de données acquises par l'IRSN et Subatech dans le cadre de bilans ou de suivis radioécologiques réalisés à la demande d'EdF ou d'AREVA.

Par ailleurs :

- Les signes « < » indiquent des résultats de mesure inférieurs aux seuils de décision 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.
- Les résultats sont assortis de commentaires faisant parfois référence aux mesures acquises antérieurement. Dans cette édition, le bilan fait ressortir certaines séries chronologiques, notamment à travers des focus spécifiques.

Expression des résultats sous forme de valeurs moyennes

Pour restituer dans ce bilan les mesures de la radioactivité dans l'environnement de manière plus synthétique et représentative, l'IRSN a choisi d'exprimer les résultats acquis sous la forme d'un estimateur unique qui tient compte de toutes les valeurs acquises en un point au cours de la période considérée, y compris des valeurs inférieures aux seuils de décision. 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 au seuil de décision ($< Y$), une valeur Y associée à une incertitude de $Y/2$. Cette méthode de substitution n'est pas la plus précise mathématiquement mais ne minimise pas l'influence possible de valeurs considérées comme non significatives.

Le meilleur estimateur de la moyenne d'un ensemble de valeurs Y_i associées à des incertitudes u_i (y compris les valeurs substituées précédemment) peut être calculé comme suit :

$$\text{Moyenne pondérée : } m = \sum_i \frac{1}{u_i^2} Y_i / \left(\sum_i \frac{1}{u_i^2} \right)$$

$$\text{Avec comme incertitude : } u_m = \sqrt{1 / \sum_i \frac{1}{u_i^2}}$$

À titre d'exemple, si l'on dispose des résultats de mesures ci-dessous (Bq/L) :

Échantillon	Résultat	Incertitude
A1	130	20
A2	140	10
A3	< 160	

Le tableau des résultats pour le calcul de la moyenne pondérée est le suivant (Bq/L) :

Échantillon	Résultat	Incertitude
A1	130	20
A2	140	10
A3	160	80

Le calcul de cette moyenne s'exprime de la façon suivante :

$$m = \frac{\frac{130}{20^2} + \frac{140}{10^2} + \frac{160}{80^2}}{\frac{1}{20^2} + \frac{1}{10^2} + \frac{1}{80^2}} = 138,0$$

L'incertitude associée est :

$$u_m = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{20^2} + \frac{1}{10^2} + \frac{1}{80^2}}} = 9,0$$

La moyenne pondérée correspondant aux trois mesures A1, A2 et A3 est donc égale à $138,0 \pm 9,0$ 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 : $23,12548 \pm 1,58569$ Bq/L, le résultat exprimé = 23,1 Bq/L.

Le détail des règles utilisées pour l'arrondissement des valeurs des mesures et des moyennes est décrit dans le document : « Moyenne, arrondissement et nombre de chiffres significatifs pour les essais interlaboratoires organisés par le STEME/LEI » – Document technique IRSN/STEME/DT/2009 – 07.

Conversion de certains résultats pour une meilleure compréhension

Afin d'exploiter tous les résultats disponibles et de restituer une information synthétique et compréhensible tout en minimisant l'utilisation d'unités diverses, l'IRSN a parfois appliqué des facteurs de conversion aux résultats bruts (afin d'exprimer les résultats en Bq/kg frais à partir d'une valeur obtenue en Bq/kg sec par exemple). En effet, les analyses radiologiques nécessitent des traitements sur les échantillons visant à réduire leur volume : ainsi les échantillons sont soit séchés en étuve soit réduits en cendre. Dans la majorité des cas, les facteurs de conversion appliqués ont été calculés sur la base des rapports poids frais/poids sec (PF/PS) ou poids frais/poids de cendre (PS/PC) mesurés sur l'échantillon analysé. Dans certains cas rares, le rapport PF/PS ou PS/PC n'étant pas disponible, une moyenne obtenue sur des échantillons comparables a alors été appliquée pour le calcul.

6.2. GLOSSAIRE

A

AASQA

Association agréée de surveillance de la qualité de l'air.

ACRO

Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest.

Actinide

Famille d'éléments chimiques de numéro atomique égal ou supérieur à l'actinium (numéro atomique 89). Quatre actinides existent à l'état naturel : l'actinium (89), le thorium (90), le protactinium (91) et l'uranium (92). Il existe également des actinides artificiels, ce sont les transuraniens (plutonium, américium, neptunium et curium).

Activation

Processus par lequel des noyaux atomiques sont rendus radioactifs sous l'action d'un rayonnement (neutrons, gamma, etc.) d'un flux de neutrons ou d'autres particules.

Activité

Nombre de désintégrations spontanées de noyaux atomiques par unité de temps. L'unité d'activité est le Becquerel (Bq). Cf. chapitre 4.

Aérosol

Suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides ou les deux, présentant une vitesse de chute négligeable. Dans l'air et dans les conditions normales, ceci correspond à des particules de diamètres inférieurs à 100 micromètres, les plus fines n'ayant que quelques fractions de nanomètres.

AFCN

Agence fédérale de contrôle nucléaire (Belgique).

AFNOR

Association française de normalisation.

Alpha (symbole α)

Rayonnement composé de noyaux d'hélium 4, fortement ionisant mais très peu pénétrant. Une simple feuille de papier est suffisante pour arrêter sa propagation. Cf. chapitre 4.

α global (alpha global)

Indice de radioactivité représentatif de l'activité des radionucléides émetteurs alpha.

ANCCLI

Association nationale des comités et commissions locales d'information.

ANDRA

Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

ANSES

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

AREVA

Groupe industriel français intervenant notamment dans le cycle du combustible et la fabrication d'installations nucléaires.

ARS

Agence régionale de santé.

ASN

Autorité de sûreté nucléaire.

Atome

Constituant de base de la matière. Il est composé d'un noyau (neutrons + protons) autour duquel gravitent des électrons. Cf. chapitre 4.

Autorisation de rejet

Elle fixe, pour chaque installation, les limites des rejets d'effluents liquides ou gazeux et les conditions de leur contrôle. Elle est accordée par arrêté interministériel, après dépôt d'un dossier soumis aux ministères chargés de l'industrie, de la santé et de l'environnement.

B

Becquerel (Bq)

Unité de mesure, légale et internationale, utilisée pour la radioactivité. Le becquerel (Bq) est égal à une désintégration par seconde. Cf. chapitre 4.

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. Cf. chapitre 4.

 β global (bêta global)

Indice de radioactivité représentatif de l'activité des radionucléides émetteurs bêta. Ne permet pas de distinguer les radionucléides contributeurs et leurs activités respectives.

BNEN

Bureau national de normalisation d'équipements nucléaires. Le BNEN est l'un des 31 bureaux de normalisation sectoriels qui composent le système national de normalisation animé par l'AFNOR.

Bruit de fond radiologique de l'environnement

Cf. chapitre 2.

Bruit de fond métrologique

Cf. chapitre 1.3.

C

CEA

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

Césium (Cs, numéro atomique 55)

Métal rare et toxique dont les caractéristiques sont comparables à celles du potassium. Les isotopes 134 et 137 sont des produits de fission radioactifs dont la période radioactive est de 2,2 ans pour le premier et de 30,17 ans pour le second.

CLI

Commission locale d'information.

CNPE

Centre nucléaire de production d'électricité.

Coefficient de dose

Cf. chapitre 4.

COFRAC

Comité français d'accréditation.

Combustible nucléaire

Matière fissile constituant la partie active du cœur d'un réacteur. Pour qu'une réaction de fission en chaîne soit possible, l'uranium naturel, mélange comprenant 0,7 % d'uranium 235 – fissile – et 99,3 % d'uranium 238 – non fissile –, a dû être préalablement enrichi à 4 % en uranium 235. Cet uranium est utilisé sous la forme d'oxyde d'uranium, particulièrement stable chimiquement.

COMURHEX (Conversion Métal URanium HEXafluorure)

Filiale d'AREVA, cette société pilote deux sites industriels en France. Le site industriel COMURHEX Malvézi assure la première étape de conversion des concentrés uranifères provenant des sites miniers en tétrafluorure d'uranium (UF₄) pour des électriciens du monde entier. Cette transformation se poursuit sur le site industriel de COMURHEX Pierrelatte (Drôme) qui transforme le tétrafluore d'uranium en hexafluore d'uranium (UF₆), dernière étape avant l'enrichissement.

CRIIRAD

Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité.

CSP

Code de la santé publique français.

Cycle du combustible

Ensemble des opérations industrielles auxquelles est soumis le combustible nucléaire. Ces opérations comprennent notamment : l'extraction et le traitement du minerai d'uranium, la conversion, l'enrichissement de l'uranium, la fabrication du combustible, le traitement des combustibles usés, le recyclage des matières fissiles récupérées pour fabriquer de nouveaux combustibles et la gestion des déchets radioactifs.

D

DDCSPP

Direction départementale de la cohésion sociale et de la protection des populations.

DDPP

Direction départementale de la protection des populations.

Débit de dose

Intensité d'exposition (énergie absorbée par la matière par unité de masse et de temps). L'unité légale est le gray par seconde (Gy/s).

Déchet

Toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire. Les déchets radioactifs sont des substances pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée.

Décroissance radioactive

Diminution naturelle de l'activité nucléaire d'une substance radioactive par désintégrations spontanées.

Démantèlement

Ensemble des opérations d'enlèvement des éléments constitutifs d'une installation nucléaire déclassée (structures et composants divers). Le démantèlement peut être partiel ou total.

DGAL

Direction générale de l'alimentation.

DGCCRF

Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes.

DGPR

Direction générale de la prévention des risques. La DGPR est constituée d'un service des risques technologiques (en charge notamment des risques radiologiques), un service de la prévention des nuisances et de la qualité de l'environnement et un service des risques naturels et hydrauliques.

DGS

Direction générale de la santé.

Dose efficace

Cf. chapitre 4.

Dosimètre DTL

Dosimètre passif thermo luminescent.

Dosimètre RPL

Dosimètre passif radio photo luminescent.

DREAL

Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement.

E

Eau de combustion

Eau obtenue en brûlant la matière sèche en présence d'oxygène et en l'absence d'autres sources d'eau pendant la combustion.

Eau de dessiccation

Eau obtenue après séchage de l'échantillon (le plus souvent par lyophilisation) permettant l'analyse du tritium libre.

EDF

Électricité de France.

Effluent

Tout gaz ou liquide, qu'il soit radioactif ou non, issu des installations.

Électron

Particule élémentaire chargée d'électricité négative. Il entre dans la composition des atomes.
Cf. chapitre 4.

Émissaire

Exutoire des effluents rejetés par une installation.

EMM

État-major de la Marine nationale.

Entreposage

Dépôt temporaire de déchets radioactifs.

Euratom

Ce traité, signé à Rome en 1957, institue la Communauté européenne de l'énergie atomique dont la mission consiste à contribuer, par le développement de l'énergie nucléaire, à la mise en commun des connaissances, des infrastructures et du financement, et à assurer la sécurité d'approvisionnement dans le cadre d'un contrôle centralisé.

EURODIF

Usine européenne d'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse.

Exposition

L'exposition est le fait d'être exposé aux rayonnements ionisants (exposition externe si la source est située à l'extérieur de l'organisme, exposition interne si la source est située à l'intérieur de l'organisme, etc.). Cf. chapitre 4.

F

FBFC

Société Franco-Belge de Fabrication de Combustibles.

Filière

Terme utilisé pour désigner un type de réacteurs nucléaires capables de produire de l'énergie. Il se définit par un ensemble de spécifications communes telles que la nature du combustible, le modérateur, la nature du fluide de refroidissement, etc. On distingue par exemple la filière uranium naturel - graphite - gaz (UNGG), les filières à eau légère, les filières à neutrons rapides (RNR).

Fissiles

Noyaux atomiques pour lesquels on peut induire la fission, par capture d'un seul neutron. Les noyaux fissiles ont une configuration d'énergie très proche de la fission spontanée.

Fission

Cassure du noyau d'un atome sous l'action de neutrons. Cette réaction est accompagnée d'une émission de neutrons, de rayonnements

ionisants et d'un fort dégagement de chaleur. C'est ce dernier qui est utilisé pour créer l'énergie électrique dans une centrale électronucléaire.

G

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. Cf. chapitre 4.

Gaz rares

Gaz dépourvus d'affinité chimique et ne donnant aucun composé par combinaison avec d'autres atomes. Ce sont l'argon, l'hélium, le krypton, le néon et le xénon.

Gestion des déchets radioactifs

Ensemble des dispositions et opérations, réglementaires ou techniques, relatives aux déchets radioactifs depuis leur production jusqu'à leur stockage inclusivement, destiné à assurer la protection des personnes et de l'environnement.

GSNIEN

Groupe de scientifiques pour l'information sur l'énergie nucléaire.

H

Hélium 4

Noyau formé de deux protons et de deux neutrons. Assemblage particulièrement stable, il peut être émis par des noyaux lourds en recherche de stabilité. On l'appelle alors rayon alpha.

I

ICPE

Installation classée pour la protection de l'environnement.

ILL

Institut Laue – Langevin. Organisme de recherche international situé à Grenoble. Il comprend un réacteur de recherche, le réacteur à haut-flux (RHF, INB n°67) d'une puissance de 58 MW, utilisé pour produire des faisceaux de neutrons.

INB

Installation nucléaire de base.

INBS

Installation nucléaire de base secrète.

Incertitude de mesure

Marge d'imprécision sur la valeur de la mesure d'une grandeur physique.

InVS

Institut national de veille sanitaire.

Iode (I, numéro atomique 53)

Corps simple dont les isotopes radioactifs sont présents dans les produits de fission. Tous les iodes radioactifs (131, 132, 133, etc.) ont une durée de vie courte (ex : l'isotope 131 a une période radioactive de 8,02 jours) à l'exception de l'iode 129 dont la période est de près de 16 millions d'années.

IRSN

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

Isotopes

Éléments dont les atomes possèdent le même nombre d'électrons et de protons, mais un nombre différent de neutrons. Ils ont le même nom, et les mêmes propriétés chimiques. On connaît actuellement environ 325 isotopes naturels et 1 200 isotopes créés artificiellement.

K

K

Symbole de l'élément potassium. Il est exprimé généralement en mg/L ou mg/kg (milligramme par litre ou par kilogramme). 1 gramme de potassium naturel a une activité (β/γ) de 31 Bq due à la décroissance de l'isotope radioactif de masse 40 (^{40}K).

M

Matrice

Sous-partie d'un compartiment (atmosphérique, terrestre, aquatique continental ou marin). Exemples : eau de pluie, sol, productions végétales, sédiments, mollusques...

MES

Matières en suspension.

MOX (Mixed Oxide)

Mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium destiné à la fabrication de certains combustibles nucléaires.

MW

Mégawatt.

N

Neutrinos

Particules élémentaires sans charge électrique ni masse connue émises lors d'interactions faibles.

Neutron

Particule fondamentale électriquement neutre qui entre, avec les protons dans la composition du noyau de l'atome. C'est le neutron qui provoque la réaction de fission des noyaux dont l'énergie est utilisée dans les réacteurs nucléaires.

Noyau

Partie centrale des atomes, de charge positive. Dix mille fois plus petit que l'atome, il en contient pourtant quasiment toute la masse. Le noyau est un assemblage de protons et de neutrons liés par l'interaction forte.

O**OMS**

Organisation mondiale de la santé.

OPERA-Air

Observatoire permanent de la radioactivité de l'environnement dans l'air de l'IRSN regroupant des stations « AS » et « TGD ».

P**Période radioactive (ou demi-vie)**

Temps au bout duquel l'activité du radionucléide a diminué de moitié. La période varie d'un radionucléide à l'autre.
Cf. chapitre 4.

Photons

Particules élémentaires sans charge ni masse, porteuses de l'interaction électromagnétique.

Plutonium (Pu, numéro atomique 94)

Élément chimique transuranien ; l'isotope 239 a une période de 24 110 ans.

Produits de fission

Fragments de noyaux lourds produits par la fission nucléaire ou la désintégration radioactive ultérieure de nucléides formés selon ce processus.

Proton

Particule élémentaire chargée positivement, constituant le noyau avec le neutron.

R**Radioactivité**

Propriété de certains éléments dont les noyaux se désintègrent spontanément pour former d'autres éléments en émettant des rayonnements ionisants.

Radionucléide

Isotope radioactif d'un élément. Exemples : ^3H : tritium, isotope radioactif de l'hydrogène. ^{14}C : carbone 14, isotope radioactif du carbone.

Radioprotection

Ensemble de mesures destinées à assurer la protection sanitaire de la population et des travailleurs au regard de l'exposition aux rayonnements ionisants.

Radiothérapie

Utilisation du pouvoir destructeur de la radioactivité dans le but de détruire des cellules malades, en minimisant les dommages aux cellules saines environnantes.

Radon (Rn)

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

Rayonnements

Ondes électromagnétiques (gamma) ou particules (alpha, bêta, neutrons) émis lors de la désintégration de radionucléides. Les rayons X sont également des ondes électromagnétiques, mais ils sont émis par des tubes électroniques. Les rayonnements sont dits « ionisants » car ils produisent des ions en traversant la matière. Les rayons gamma, X, ultra-violet, et la lumière visible sont de même nature, mais diffèrent par leur pouvoir de pénétration et leur capacité à créer des ionisations.
Cf. chapitre 4.

Rayonnement ionisant

Rayonnement susceptible d'arracher des électrons à la matière. Cf. chapitre 4.

REP

Réacteur à eau sous pression. Désigne un réacteur nucléaire utilisant l'uranium ou l'oxyde mixte uranium-plutonium comme combustible et de l'eau ordinaire maintenue à haute pression (155 bars, afin d'éviter sa vaporisation) comme fluide caloporteur. Le parc électronucléaire français repose sur l'utilisation de cette filière, qui compte le plus grand nombre d'unités en service dans le monde.

RNM

Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement.

RNR

Réacteur à neutrons rapides.

S

SCL

Service commun des laboratoires (anciennement les laboratoires de la DGCCRF). Le SCL effectue depuis 1986, date de l'accident de Tchernobyl, des contrôles réguliers sur les niveaux de radioactivité présents dans les produits de consommation.

SET

Filiale d'AREVA, la Société d'enrichissement du Tricastin est le maître d'ouvrage du projet et l'exploitant de l'usine Georges Besse II. Elle est implantée sur le site du Tricastin.

Seuil de décision (SD)

Le seuil de décision est la valeur minimale que doit avoir la mesure d'un échantillon pour que le métrologue puisse « décider » que cette activité est présente et donc mesurée. En dessous de cette valeur, l'activité de l'échantillon est donc trop faible pour être estimée. Ce seuil de décision dépend de la performance et du rayonnement ambiant autour des moyens métrologiques utilisés. Cf. chapitre 1.3.

SICN

Filiale d'AREVA, la Société industrielle de combustible nucléaire produisait les combustibles nucléaires pour la filière uranium naturel graphite-gaz (UNGG) sur deux sites aujourd'hui reconvertis dans des activités non nucléaires (Annecy) ou en cours de démantèlement (Veurey-Voroize).

Sievert (Sv)

Unité légale d'équivalent de dose (ou dose efficace) qui permet de rendre compte de l'effet biologique produit par une dose absorbée donnée sur un organisme vivant. L'équivalent de dose n'est pas une quantité physique mesurable mais obtenue par le calcul. Elle dépend de l'énergie transmise aux tissus, du type de rayonnement et du tissu traversé. Cf. chapitre 4.

SOCATRI

Filiale d'AREVA, la Société auxiliaire du Tricastin comprend une installation nucléaire de base (INB 138) et une installation d'Assainissement et de Récupération d'Uranium (ARU).

Spectrométrie

Analyse de l'intensité d'un rayonnement émis par une source en fonction de son niveau d'énergie. Cette méthode permet à la fois d'identifier les radioéléments et de préciser leur activité.

SPRA

Service de protection radiologique des armées. Le SPRA est placé sous la responsabilité du directeur central du service de santé des armées.

Station AS

Station fixe de prélèvement d'aérosols.

Station TGD

Station de prélèvement d'aérosols à « très grand débit » de l'IRSN.

Stérile minier

Zone minérale dont l'exploitation est jugée non rentable en raison de sa faible concentration.

Strontium (Sr, numéro atomique 38)

Élément alcalino-terreux dont certains isotopes sont très abondants dans les produits de fission, en particulier l'isotope 90, qui se fixe dans les tissus osseux et dont la période radioactive est de 28,15 ans.

T

Traitement des combustibles usés

Ensemble des opérations relatives à l'extraction des matières fissiles et fertiles (uranium et plutonium) des combustibles usés, de façon à permettre leur réutilisation et pour conditionner les différents déchets sous une forme apte à l'entreposage ou au stockage.

Transuraniens

Famille des éléments chimiques plus lourds que l'uranium (numéro atomique 92). Les principaux transuraniens sont : Neptunium (93), Plutonium (94), Américium (95), Curium (96).

U

UNGG

Réacteur à uranium naturel gaz graphite. Des réacteurs de ce type ont fonctionné sur les sites des CNPE de Bugey, Chinon et Saint-Laurent-des-Eaux.

U pondéral

Teneur massique en uranium dans une matrice, sans distinction de sa composition isotopique. Elle peut être mesurée ou déduite de l'activité (exprimée en Bq) de chacun des isotopes (on parle alors d'« équivalent U pondéral »).

Uranium

Élément chimique de numéro atomique 92 et de symbole U, possédant trois isotopes naturels : l'uranium 234, l'uranium 235 et l'uranium 238. L'uranium 235 est le seul nucléide fissile naturel, une qualité qui explique son utilisation comme source d'énergie.

6.3. COMITÉ ÉDITORIAL

Coordination éditoriale et réalisation

Service d'étude et de surveillance de la radioactivité dans l'environnement (SESURE) du Pôle radioprotection – environnement – déchets – crise (PRP) de l'Institut.

Pilotage

Philippe RENAUD

Rédaction

Valérie BRUNO
Pedro CALDEIRA IDEIAS
Philippe CALMON
David CLAVAL
Céline COUVEZ
Donato D'AMICO
Christophe DEBAYLE
Fabrice LEPRIEUR
Olivier MASSON
Olivier PIERRARD
Laurent POURCELOT
Sylvie ROUSSEL-DEBET
Philippe RENAUD
Lionel SAEY
Damien TOURNIEUX

Comité de relecture

Valérie BRUNO
Pascale DELABBAYE
Guillaume MANIFICAT
Philippe RENAUD
Sylvie ROUSSEL-DEBET
Lionel SAEY

Le programme de surveillance du territoire de l'IRSN nécessite les compétences techniques et les moyens métrologiques de plusieurs laboratoires de l'Institut :

- le laboratoire de surveillance et d'expertise environnementale par échantillonnage ;
- le laboratoire de surveillance atmosphérique et d'alerte ;
- le laboratoire d'études radioécologiques en milieux continental et marin ;
- le laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville ;
- le laboratoire de traitement des échantillons ;
- le laboratoire de mesure nucléaire ;
- le laboratoire de mesure de la radioactivité dans l'environnement ;
- les groupes régionaux du service d'intervention et d'assistance en radioprotection ;
- le bureau d'expertise et d'étude de la radioactivité naturelle.

Les prélèvements d'échantillons effectués dans le cadre de ce programme sont répartis sur l'ensemble du territoire et ne pourraient se faire sans la contribution de nombreux correspondants :

- les services techniques des exploitants nucléaires et des centres de recherches ;
- Météo France ;
- la Marine nationale ;
- la Gendarmerie nationale
- des institutions locales et des services déconcentrés de l'État (mairies, préfetures, agences régionales de santé) ;
- la Direction générale de l'alimentation (DGAL) ;
- la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF).

Pour toute information complémentaire, vous pouvez contacter :

IRSN / PRP-ENV / SESURE
31, rue de l'Écluse
BP 40035
78116 Le Vésinet Cedex

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

B.P. 17
92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

Site Internet

www.irsn.fr

**Pôle radioprotection,
environnement, déchets et crise
PRP-ENV**

31, rue de l'Écluse
B.P. 40035
78116 Le Vésinet Cedex

Téléphone

+33 (0)1 30 15 52 00

Mail

contact@irsn.fr