



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

BILAN DE L'ÉTAT RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS DE 2021 À 2023



MEMBRE DE

ETSON



réseau national

réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement

BILAN DE L'ÉTAT RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS DE 2021 À 2023

SOMMAIRE

01. INTRODUCTION	4
1.1. COMPRENDRE LA RADIOACTIVITÉ ET LES EXPOSITIONS DES PERSONNES QU'ELLE PEUT ENGENDRER	6
Les radionucléides	6
Les rayonnements	7
L'activité d'un radionucléide	7
La période radioactive (ou demi-vie)	8
Les modes d'exposition à la radioactivité environnementale	9
La dose	9
1.2. LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	11
Du plan de prélèvement d'échantillons de l'environnement aux résultats d'analyses radiologiques	12
La surveillance radiologique du compartiment atmosphérique	13
La surveillance radiologique du compartiment aquatique	15
La surveillance radiologique du compartiment terrestre	16
1.3. LE « BRUIT DE FOND » RADIOLOGIQUE EN FRANCE MÉTROPOLITAINE	17
L'exposition externe au rayonnement cosmique	17
Les radionucléides cosmogéniques	18
Les radionucléides telluriques	19
L'exposition au rayonnement tellurique	20
Le radon	20
L'exposition par ingestion de radionucléides naturels	21
Les radionucléides artificiels rémanents des retombées globales	22
La rémanence actuelle des retombées globales de radionucléides d'origine artificielle et les expositions associées	24
Bilan de l'exposition annuelle des Français au bruit de fond radiologique (2014-2019)	24
1.4. LES GAMMES D'ACTIVITÉS DU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE	25
02. DONNÉES RELATIVES AUX DIFFÉRENTS SITES NUCLÉAIRES FRANÇAIS	30
2.1. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ (CNPE) EN EXPLOITATION	32
Les rejets d'effluents radioactifs	33
Les plans de surveillance de l'environnement d'un CNPE	34
Influence des CNPE sur leur environnement et expositions du public associées	36
Influence des rejets d'effluents liquides triés	48
Influence des CNPE sur les activités de tritium dans les eaux de boisson	56
Influence des rejets liquides d'autres radionucléides	57
Conclusion générale	61
2.2. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN COURS DE DÉCONSTRUCTION OU MIS À L'ARRÊT DÉFINITIVEMENT	65
Le site de Creys-Malville	65
Le site de Brennilis	74
Le site de Fessenheim	80
2.3. LES SITES INDUSTRIELS	100
Le site de Malvézi	100
Le site Orano du Tricastin	111
Le site de Romans-sur-Isère	119
Le site de La Hague	124
Le centre de stockage de l'Aube et le centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage de Morvilliers	167
2.4. LES SITES DE RECHERCHE	173
Le site de Bruyères-le-Châtel	173
Le site de Cadarache	185
Le site du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds) à Caen	191
Le site CEA de Fontenay-aux-Roses	196
Centre CEA et Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble	203
Le site de Marcoule (Gard)	213
Le site de Saclay	226
Le site de Valduc	237
2.5. LES BASES NAVALES NUCLÉAIRES	247
Description	247
Les rejets radioactifs	249
La surveillance radiologique de l'environnement	249
Influence des sites sur l'environnement	252
2.6. SYNTHÈSE DOSIMÉTRIQUE	262

03. INSTALLATIONS CLASSÉES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (ICPE)	266
3.1. INTRODUCTION	268
3.2. LE SITE INDUSTRIEL DE SOLVAY LA ROCHELLE	269
Les rejets radioactifs	270
Surveillance radiologique de l'environnement du site	271
Influence sur le milieu atmosphérique	271
Influence sur le milieu aquatique	276
Évaluation dosimétrique	277
Bilan	277
3.3. LES ANCIENS SITES MINIERS	278
Introduction	278
Influence potentielle des anciens sites miniers sur leur environnement et expositions du public	282
La surveillance de l'environnement autour des anciens sites miniers	282
3.4. LE SITE DU BERNARDAN	284
Présentation générale du site	284
Plan de surveillance	288
Influence du site du Bernardan sur son environnement	292
04. ÉLÉMENTS D'ACTUALITÉ SUR LA PÉRIODE 2021-2023	304
4.1. SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ EN UKRAINE	304
4.2. INCIDENT DANS LE SOUS-MARIN « PERLE » À TOULON EN SEPTEMBRE 2022	305
4.3. INCIDENT À L'USINE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE EN SEPTEMBRE 2022	306
4.4. DÉTECTION DE COBALT-60 SUR UN ÉCHANTILLON D'AÉROSOLS PRÉLEVÉ PAR LA STATION OPERA-AIR DE L'IRSN DU CNPE D'EDF DE CIVAUX (VIENNE) EN 2023	307
4.5. SINGULARITÉ RADIOLOGIQUE D'ORIGINE NATURELLE DANS LES SABLES DE LA PLAGE DE TRÉBÉZY ET DE SES ENVIRONS	308
4.6. INCIDENT RADIOLOGIQUE À L'ACIÉRIE LME DE TRITH-SAINT-LÉGER	310
4.7. ÉPISODE DE SABLES SAHARIENS SUR LA FRANCE DE FÉVRIER 2021 ET DE SEPTEMBRE 2023	311
05. ANNEXES	312
5.1. MODALITÉS DE PRÉSENTATION ET D'EXPLOITATION DES RÉSULTATS DE MESURE DANS LE BILAN RADIOLOGIQUE 2021-2023	314
5.2. CALCUL DE MOYENNE ET PRISE EN COMPTE DES VALEURS NON SIGNIFICATIVES	316
5.3. LA REPRÉSENTATION D'INDICATEURS SOUS FORME DE « BOÎTE À MOUSTACHES »	318
5.4. MÉTHODE UTILISÉE POUR ESTIMER LES DOSES	319
5.5. GLOSSAIRE	327
5.6. COMITÉ ÉDITORIAL	335

Journée découverte de l'IRSN : exposition et ateliers scientifiques organisés à Cherbourg (Manche) le 24 juin 2023 à l'occasion du 60^e anniversaire du Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville.



© Sophie Brändström/Signatures/Médiathèque IRSN

01

INTRODUCTION

1.1. COMPRENDRE LA RADIOACTIVITÉ ET LES EXPOSITIONS DES PERSONNES QU'ELLE PEUT ENGENDRER	6
Les radionucléides.....	6
Les rayonnements.....	7
L'activité d'un radionucléide.....	7
La période radioactive (ou demi-vie).....	8
Les modes d'exposition à la radioactivité environnementale.....	9
La dose.....	9
1.2. LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	11
Du plan de prélèvement d'échantillons de l'environnement aux résultats d'analyses radiologiques.....	12
La surveillance radiologique du compartiment atmosphérique.....	13
La surveillance radiologique du compartiment aquatique.....	15
La surveillance radiologique du compartiment terrestre.....	16
1.3. LE « BRUIT DE FOND » RADIOLOGIQUE EN FRANCE MÉTROPOLITAINE	17
L'exposition externe au rayonnement cosmique.....	17
Les radionucléides cosmogéniques.....	18
Les radionucléides telluriques.....	19
L'exposition au rayonnement tellurique.....	20
Le radon.....	20
L'exposition par ingestion de radionucléides naturels.....	21
Les radionucléides artificiels rémanents des retombées globales.....	22
La rémanence actuelle des retombées globales de radionucléides d'origine artificielle et les expositions associées.....	24
Bilan de l'exposition annuelle des Français au bruit de fond radiologique (2014-2019).....	24
1.4. LES GAMMES D'ACTIVITÉS DU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE	25

Dans cette nouvelle édition du bilan de l'état radiologique de l'environnement français (2021 à 2023), les chapitres « Comprendre la radioactivité », « Surveillance de l'environnement », « Bruit de fond radiologique » et « Sources d'information » ont été regroupés, sous forme d'infographies, dans ce chapitre introductif. L'objectif de cette nouvelle présentation est de synthétiser les informations essentielles à la compréhension du reste du document. Néanmoins pour les lecteurs qui souhaitent approfondir ces thématiques, l'intégralité du contenu de ces chapitres constitue un rapport d'informations complémentaires consultable et téléchargeable sur les sites de l'IRSN, de l'ASN et du RNM.

Crédits illustrations : jack0m/iStock, Chromatiques/Freeipk, Freeipk, kbeis/iStock, filo/iStock.

Crédits photos de la figure p. 12, de 1 à 8 : Gilles Deschamps/Signatures/Médiathèque IRSN, Gilles Deschamps/Signatures/Médiathèque IRSN, Arnaud Bouissou/MEDDE/Médiathèque IRSN, Florence Levillain/Signatures/Médiathèque IRSN, Olivier Seignette/Mikaël Lafontan/Médiathèque IRSN, Philippe Dureuil/Médiathèque IRSN, Laurent Zylberman/Graphix-Images/Médiathèque IRSN, Rodolfo Gurriaran/Médiathèque IRSN.

1.1. Comprendre la radioactivité et les expositions des personnes qu'elle peut engendrer

La **radioactivité** est un phénomène naturel qui existe depuis l'origine de l'Univers (il y a des milliards d'années) lorsque les **atomes** se sont formés.



Dans notre quotidien, nous sommes en contact permanent avec la radioactivité présente dans notre environnement et sommes exposés aux rayonnements qu'elle induit. Celle-ci peut-être d'origine naturelle ou artificielle (chapitre 1.2)

1. Les radionucléides

L'atome, constituant de la matière, est composé d'un noyau central (lui-même composé de protons et de neutrons), ainsi que d'un nuage périphérique composé d'électrons. Certains noyaux atomiques sont instables, ils sont dits « radioactifs ». Pour acquérir une meilleure stabilité, ils expulsent, à un moment donné, une quantité d'énergie ou une particule sous forme de « rayonnement ». On dit qu'ils se désintègrent. Ce phénomène est appelé « radioactivité ».



Un radionucléide est l'isotope radioactif d'un élément (ex. : le carbone-14 pour le carbone, le tritium pour l'hydrogène...).

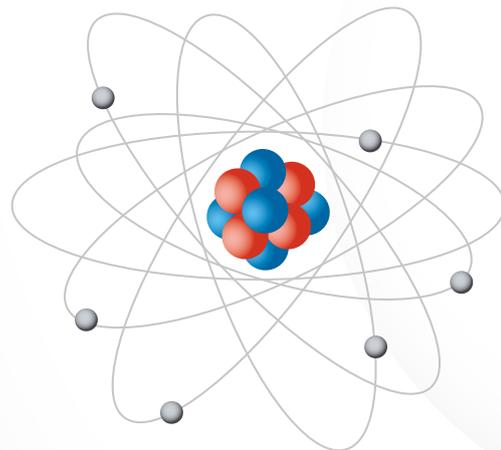
Les **isotopes** sont des atomes qui possèdent le même nombre d'électrons et de protons (pour rester neutre), mais un nombre différent de neutrons.

Les isotopes d'un même élément ont des propriétés chimiques identiques mais des propriétés physiques différentes (stables ou radioactifs notamment).

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE D'UN ATOME DE CARBONE-14

Noyau : ● 6 protons
● 8 neutrons

● 6 électrons



L'HYDROGÈNE A 3 ISOTOPES

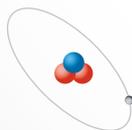
L'hydrogène a 3 isotopes ; seul le tritium est radioactif.



Hydrogène classique H :
1 proton
0 neutron



**Hydrogène ²H
Le deutérium :**
1 proton
1 neutron

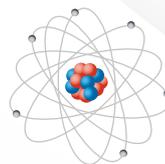


**Hydrogène ³H
Le tritium :**
1 proton
2 neutrons

L'URANIUM A PLUSIEURS ISOTOPES

L'uranium a plusieurs isotopes ; tous sont radioactifs.

Les principaux sont l'uranium-238, l'uranium-234 et l'uranium-235.



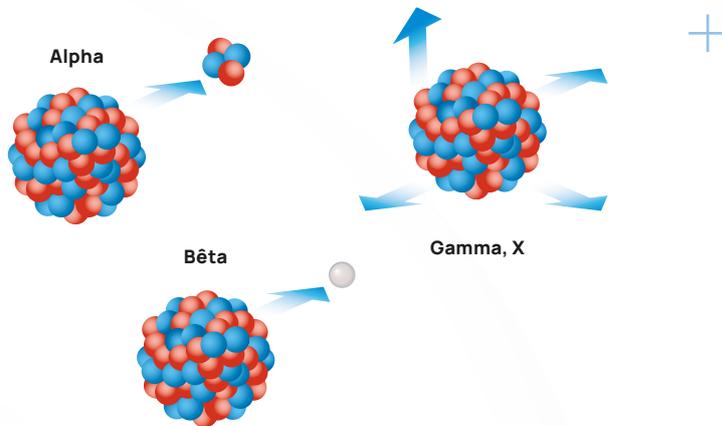
Uranium-234
92 protons
142 neutrons

Uranium-235
92 protons
143 neutrons

Uranium-238
92 protons
146 neutrons

2. Les rayonnements

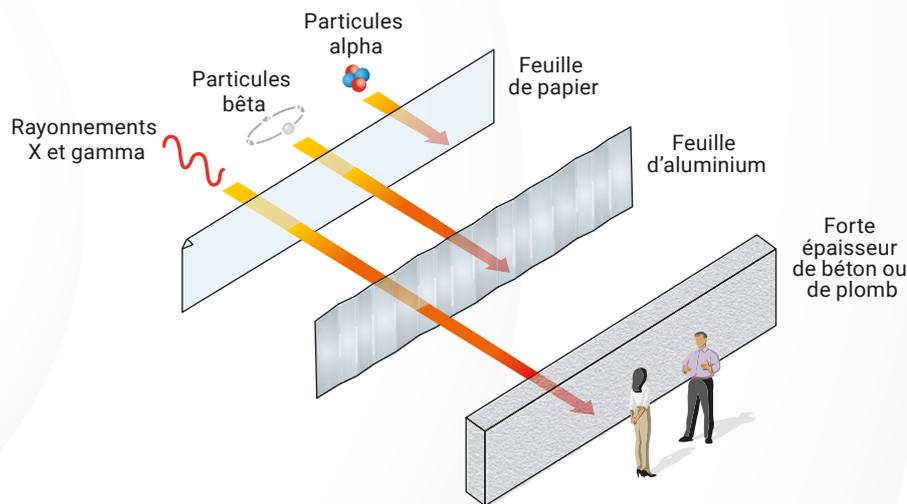
Lorsqu'un atome se désintègre, il peut émettre différents types de rayonnements. Ces rayonnements sont susceptibles d'arracher des électrons aux atomes de la matière qui les reçoit et donc d'ioniser cette matière. C'est pourquoi ces rayonnements sont dits « ionisants ».



Les principaux rayonnements ionisants issus de la désintégration des radionucléides sont :

- **Alpha** : constitués par un flux de noyaux d'hélium ;
- **Bêta** : constitués par un flux d'électrons ;
- **les ondes électromagnétiques X et gamma** : composées de photons.

PARCOURS DES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENT



3. L'activité d'un radionucléide

L'activité d'un radionucléide, exprimée en Becquerel (Bq), est le nombre de désintégration qu'il produit par seconde (1 Bq = 1 désintégration par seconde). Le nombre de désintégrations par seconde étant proportionnel au nombre d'atomes radioactifs, l'activité d'un radionucléide correspond à une quantité de ce radionucléide.

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 concentration) de ce radionucléide dans l'échantillon.

Pour quantifier les rejets radioactifs d'une installation nucléaire, le becquerel étant une unité très petite, on utilise des multiples : kilo-becquerel kBq (= 1000 Bq), mégabecquerel MBq (= 1000 kBq), giga-becquerel GBq (= 1000 MBq), téra-becquerel TBq (= 1000 GBq).

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).

4. La période radioactive (ou demi-vie)

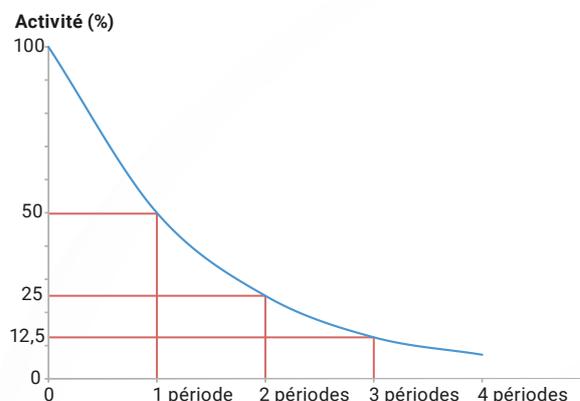
La désintégration d'un atome entraîne soit la formation d'un autre atome radioactif (d'un autre radionucléide), soit la production d'un atome stable (non-radioactif).

Elle entraîne donc la diminution de l'activité du radionucléide considéré. La période radioactive d'un radionucléide est le temps nécessaire pour que l'activité d'un radionucléide donné soit réduite de moitié.



La période radioactive varie suivant le radionucléide d'une fraction de seconde à des milliards d'années.

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE LA DÉCROISSANCE RADIOACTIVE



PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS PRÉSENTS DANS L'ENVIRONNEMENT EN FRANCE

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- ^m Ba*	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

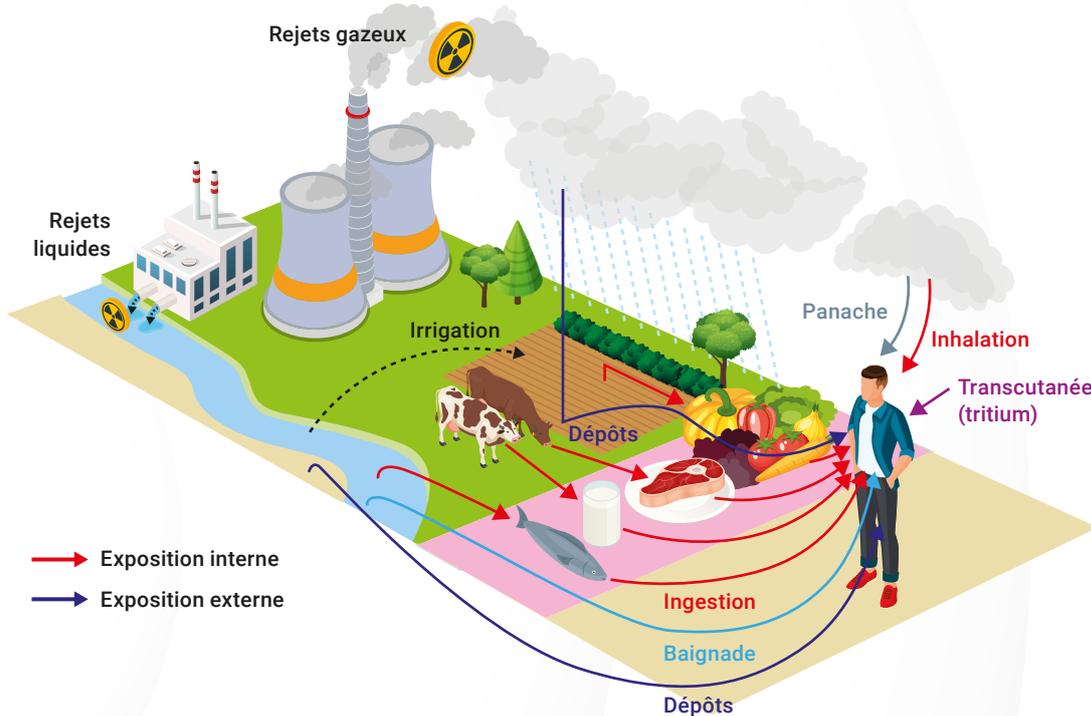
1 : naturel – 2 : rejets d'installation nucléaire – 3 : rémanence des essais d'armes nucléaires – 4 : rémanence de l'accident de Tchernobyl.
* Par souci de simplification, seul le radionucléide père est mentionné dans le rapport.

5. Les modes d'exposition à la radioactivité environnementale

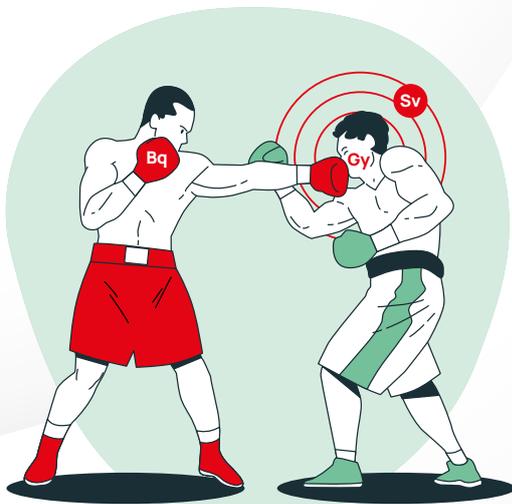
Une personne peut être exposée de plusieurs manières à la radioactivité présente dans l'environnement :

- **externe** : la source du rayonnement lui est extérieur (le sol par exemple) ;
- **interne** : si le radionucléide pénètre dans l'organisme par inhalation ou ingestion.

MODES D'EXPOSITION AUX RADIONUCLÉIDES PRÉSENTS DANS L'ENVIRONNEMENT ET REJETÉS PAR LES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES



6. La dose



La dose absorbée par la matière – exprimée en gray (Gy) – correspond à la quantité d'énergie cédée par les rayonnements ionisants – exprimée en joules (J) – par kilogramme (kg) de matière traversée. En y cédant leur énergie, les rayonnements ionisants peuvent endommager les tissus de l'organisme. Ces dommages et leurs conséquences dépendent de la nature du rayonnement, de son énergie et du devenir du radionucléide dans l'organisme lorsqu'il est ingéré ou inhalé.

L'estimation de la dose efficace permet de quantifier et de comparer les différentes expositions auxquelles peut être soumise 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).
Il est courant d'utiliser des sous-multiples du Sv :

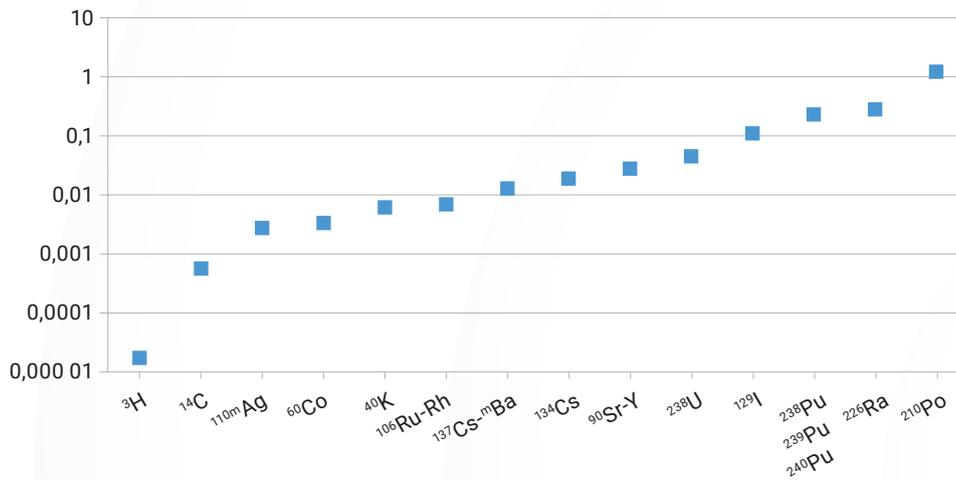
- 1 milli Sv (mSv) = 0,001 Sv ;
- 1 micro Sv (μ Sv) = 0,000001 Sv.

Pour une même activité ingérée ou pour une même activité déposée sur le sol, les doses générées par les radionucléides peuvent être très différentes. Elles dépendront 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 100 000 fois moins radiotoxique par ingestion que le polonium-210. Il ne produit par ailleurs aucune exposition externe.

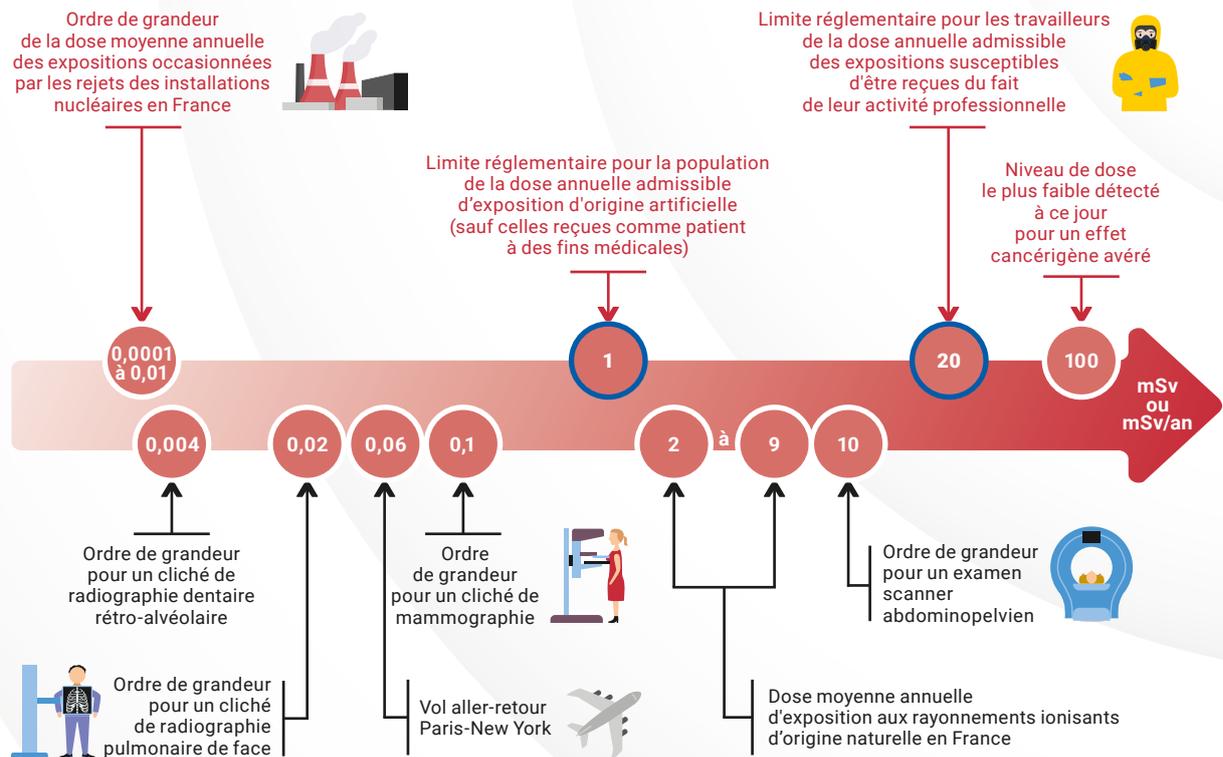
De manière générale, les radionucléides émetteurs alpha (plutonium, radium, polonium et uranium) sont les plus radiotoxiques par ingestion. En raison de leur rayonnement gamma de forte énergie, l'argent-110m, le cobalt-60, les césiums déposés à la surface du sol sont les plus irradiants.

EXEMPLE DE DOSES EFFICACES POUR UNE INGESTION UNITAIRE ($\mu\text{Sv/Bq}$) POUR LES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES MESURÉS DANS L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS

Dose efficace par ingestion unitaire pour un adulte ($\mu\text{Sv/Bq}$ ingéré)

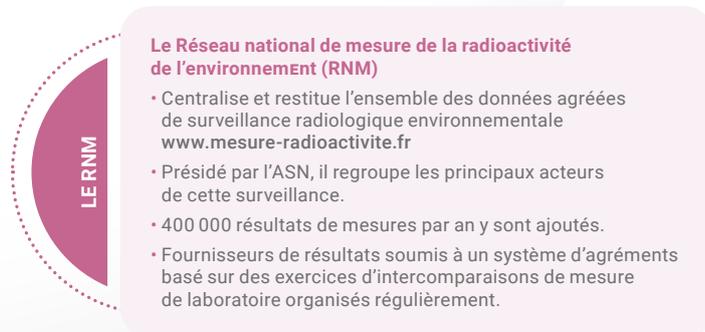
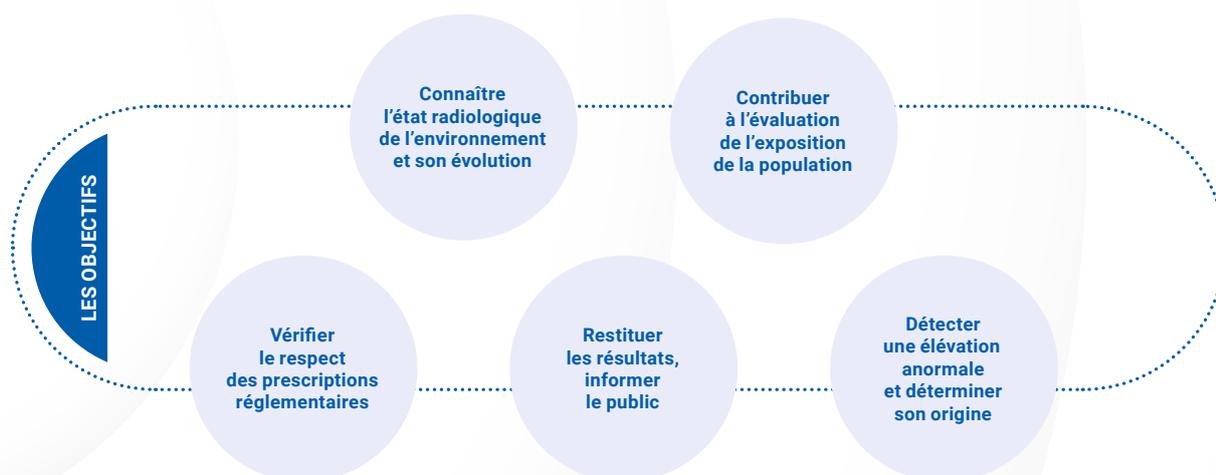


LIMITES RÉGLEMENTAIRES D'EXPOSITION ET EXEMPLES DE DOSES EFFICACES REÇUES LORS D'EXAMENS MÉDICAUX (mSv ou mSv/an)



1.2. La surveillance radiologique de l'environnement

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



Outre dans le RNM, les données de la surveillance, ainsi que les informations sur la surveillance radiologique de l'environnement, sont également consultables sur les sites internet des principaux producteurs de données et des acteurs intéressés (exploitants, IRSN, ASN, HCTISN, etc.).

1. Du plan de prélèvement d'échantillons de l'environnement aux résultats d'analyses radiologiques

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 ;
- **le traitement et la mesure en laboratoire** d'échantillons représentatifs prélevés dans différentes composantes de l'environnement.

Le prélèvement des échantillons s'effectue *via* deux méthodes :

- des prélèvements ponctuels d'échantillons environnementaux (eaux, indicateurs biologiques, les sols, sédiment et denrées) ;
- des dispositifs de prélèvement en continu. Ces prélèvements concernent essentiellement les mesures effectuées dans le compartiment atmosphérique et dans les eaux de surface.

Suivant les objectifs recherchés, les modalités de surveillance sont adaptées en fonction des contraintes liées aux analyses à réaliser et aux niveaux de performances souhaités.

PRINCIPALES ÉTAPES DES TRAITEMENTS DES ÉCHANTILLONS ENVIRONNEMENTAUX EN VUE D'UNE ANALYSE DE LA RADIOACTIVITÉ



1. Prélèvement, conditionnement et enregistrement de l'échantillon



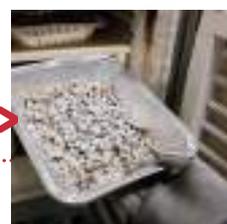
2. Séchage à l'étuve



3. Lyophilisation



4. Broyage et homogénéisation



5. Calcination

Traitement d'homogénéisation et de concentration de la radioactivité de l'échantillon (2, 3, 4, 5 et 6)



6. Radiochimie pour séparer et purifier les radionucléides à analyser



7.1 Détection des rayonnements alpha (spectrométrie alpha)



7.2 Détection des rayonnements bêta (scintillation liquide)



7.3 Détection des rayonnements gamma (spectrométrie gamma)



8. Spectrométrie de masse par ICP-MS ou accélérateur

Quantification de l'activité du radionucléide par détection des rayonnements (7.1, 7.2 et 7.3) ou de sa masse (8)

Les radionucléides rejetés par les installations nucléaires sont multiples et différents en fonction du type d'installation et de sa phase de fonctionnement.

Cette partie présente ainsi un état des lieux synthétique des grandes techniques mises en œuvre aujourd'hui dans les laboratoires de mesure des échantillons environnementaux.

De nombreuses méthodes de mesurage de la radioactivité dans l'environnement sont utilisées en fonction des radionucléides recherchés, des matrices à analyser et des performances métrologiques visées. Elles peuvent être divisées de façon générique en deux grandes typologies : la mesure du rayonnement émis par les radionucléides, alpha, bêta ou gamma, et la mesure de l'abondance en masse des radionucléides présents pour remonter à leur activité (on parle alors de spectrométrie de masse).

Le seuil de décision (SD) est la valeur en dessous de laquelle l'activité de l'échantillon est trop faible pour être estimée. Ce SD dépend de la performance technique des appareils et du rayonnement ambiant autour des moyens métrologiques utilisés. Dans ce document, une activité mesurée, supérieure aux seuils de décision, est dite « significative ».

2. La surveillance radiologique 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 analyses réalisées en différé au laboratoire d'autre part.



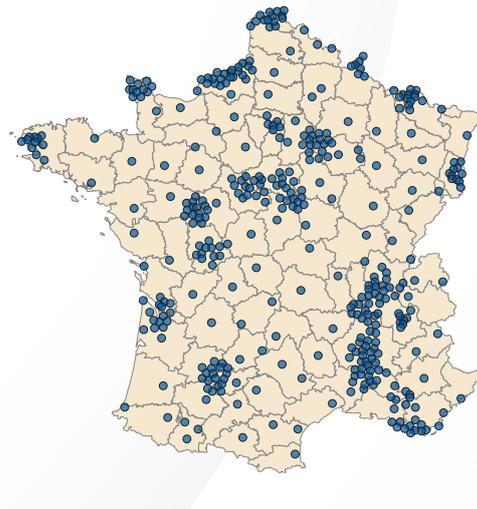
MESURE EN CONTINU DU RAYONNEMENT GAMMA AMBIANT

- 550 balises des exploitants nucléaires implantées dans un rayon de 10 km autour de leurs installations.
- 491 balises de l'IRSN (Téléray) implantées entre 10 et 30 km autour des sites ainsi que sur les grandes villes de chaque département, y compris en outre-mer.



Alerter immédiatement si des dispositions d'urgence sont nécessaires pour protéger la population.

RÉSEAU NATIONAL DE TÉLÉMESURE TÉLÉRAY EN FRANCE MÉTROPOLITAINE ET CORSE



DOSIMÉTRIE PASSIVE ENVIRONNEMENTALE

Surveillance par dosimétrie passive effectuée à l'aide de dosimètres radiophotoluminescents (RPL) implantés sur le périmètre de certains sites nucléaires (pour les exploitants) ou couvrant l'ensemble du territoire national en ce qui concerne le réseau RPL de l'IRSN.



S'assurer *a posteriori* (temps d'intégration mensuel à trimestriel puis analyse différée en laboratoire) du respect de la réglementation.

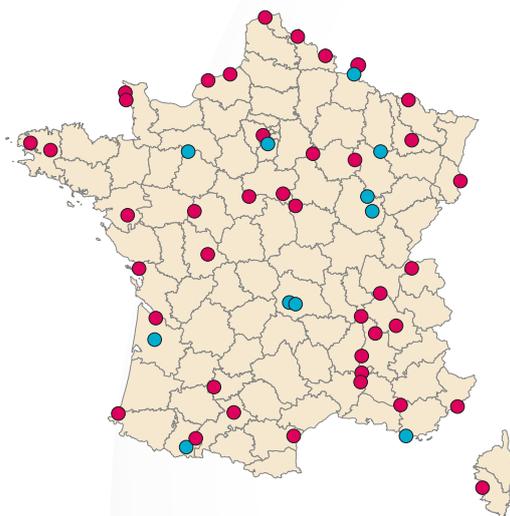


Déceler aussi précocement que possible toute élévation anormale si faible soit-elle.

PRÉLÈVEMENTS ET ANALYSES D'AÉROSOLS ATMOSPHÉRIQUES OU DE GAZ

- **1 à 6 stations de prélèvement implantées** par les exploitants nucléaires autour de chacun de leurs sites.
- **51 stations de l'IRSN** : 1 sur chaque site, les autres réparties sur le territoire national.
- Types de préleveur et d'analyses réalisées en fonction des radionucléides que l'installation est autorisée à rejeter.
- **Prélèvements quotidiens à hebdomadaires** et débits de pompage adaptés aux objectifs.

RÉPARTITION DES STATIONS DU RÉSEAU OPERA-Air DE L'IRSN EN FRANCE MÉTROPOLITAINE ET EN CORSE



En France, la surveillance radiologique des aérosols à l'échelle nationale est assurée par l'IRSN.



Préleveur 700 m³/h



Préleveur 80 m³/h

© DR

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.

Avec les gaz rares, le tritium et le carbone-14 sont les principaux radionucléides rejetés dans l'air par les installations nucléaires. Les prélèvements sont réalisés par barbotage de l'air aspiré dans des pots remplis d'eau pour le tritium et de soude pour le carbone-14.

Depuis quelques années, l'IRSN utilise un dispositif de prélèvement passif de la vapeur d'eau tritiée atmosphérique, en cours de normalisation, qu'il a lui-même développé. Les piègeurs passifs constituent une alternative aux barboteurs beaucoup moins contraignante.

D'autres radionucléides présents dans les rejets atmosphériques de certaines installations peuvent aussi être prélevés et analysés tels que l'iode (gazeux par piégeage sur charbon actif et particulaire sur filtre) et le krypton-85 (gaz rare rejeté essentiellement par l'usine Orano de La Hague et prélevé grâce à un moniteur de gaz rare).

BARBOTEURS POUR LE PRÉLÈVEMENT DU TRITIUM OU DU CARBONE-14 ATMOSPHÉRIQUE



© Pascal Paulat/Médiathèque IRSN



Cas particulier du radon-222 : les descendants de ce gaz radioactif sont présents dans l'atmosphère sous forme de particules (aérosols) solides. Ce sont ces aérosols, qui, une fois inhalés sont à l'origine des doses habituellement attribuées au radon. L'Énergie Alpha Potentielle volumique ou EAPv est un paramètre utilisé pour quantifier physiquement l'énergie qui peut potentiellement se déposer dans les voies respiratoires, il s'exprime en J/m³ (joule par mètre cube).



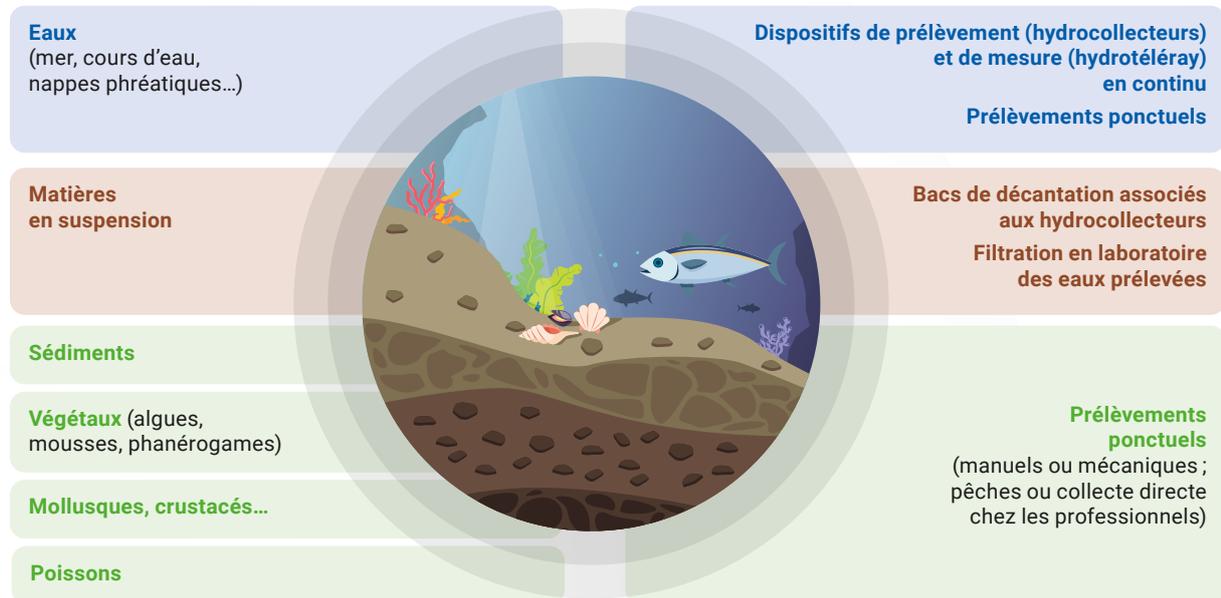
© P. Demail

COLLECTE ET ANALYSE D'EAU DE PLUIE

- En complément des analyses de gaz ou d'aérosols.
- 1 collecteur implanté par les exploitants nucléaires autour de chacun de leurs sites.
- 1 collecteur de l'IRSN : 1 sur chaque site et les autres réparties sur le territoire.
- Types d'analyses en fonction des radionucléides rejetés par l'installation.
- Prélèvements hebdomadaires à mensuels.

3. La surveillance radiologique du compartiment aquatique

Milieu récepteur des rejets liquides des installations et des apports éventuels par les eaux de ruissellement, l'eau est le vecteur direct des radionucléides vers le compartiment aquatique, qu'il s'agisse d'un cours d'eau ou de la mer.



EAU DES FLEUVES ET RIVIÈRES

- **Prélèvement et mesure en continu :**
 - 1 mesure gamma toutes les 2 heures en aval des grands fleuves ;
 - 1 prélèvement séquentiel continu et 1 mesure de tritium journalière ou hebdomadaire en aval d'installations nucléaires.
- **Prélèvements ponctuels lors des rejets.**



Déceler aussi précocement que possible toute élévation anormale.



S'assurer du respect des prescriptions réglementaires.



© DR

EAUX SOUTERRAINES

Les eaux souterraines font également l'objet d'une surveillance réglementaire de la part des exploitants *via* des prélèvements ponctuels grâce à des ouvrages spécialement aménagés : les piézomètres. L'objectif est de s'assurer du bon état radiologique des eaux souterraines et le cas échéant de part leur positionnement, de déceler un éventuel marquage ou de suivre l'évolution d'un marquage ancien.



Dans le compartiment aquatique continental, les prélèvements sont généralement réalisés en amont et en aval des sites nucléaires. Dans le compartiment aquatique marin, les prélèvements sont réalisés en champ proche et en champ lointain des installations.

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.

FAUNE ET FLORE AQUATIQUES

La surveillance du compartiment aquatique est complétée par des campagnes de prélèvements 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 d'effluents liquides par des installations.

4. La surveillance radiologique du compartiment terrestre

Végétaux

(herbes, feuilles d'arbre, mousses...)

Productions végétales

(céréales, légumes, fruits, vin...)

Productions animales

(lait, viande, œufs...)



Prélèvements ponctuels

(manuels, collecte chez les producteurs, abattoirs...)

Sols

Prélèvements ponctuels (manuels)

Spectrométrie gamma *in situ*

LES VÉGÉTAUX TERRESTRES

En raison de leur aptitude à capter les radionucléides présents dans l'air, l'herbe, les feuilles d'arbres et les lierres sont notamment prélevés comme bio-indicateurs.

LES SOLS

Pour les radionucléides de période radioactive suffisamment longue (quelques années), les sols constituent des intégrateurs des dépôts qui peuvent migrer progressivement en profondeur jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres.

LES DENRÉES D'ORIGINE ANIMALE ET VÉGÉTALE

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.

Le **tritium** présent dans l'air sous forme de vapeur d'eau (HTO) et le **carbone-14** présent dans l'air sous forme de dioxyde de carbone (CO₂), sont incorporés aux végétaux par la photosynthèse.

Les feuilles des végétaux terrestres sont directement exposées au dépôt des **autres radionucléides** présents dans l'air sous forme d'aérosols. Elles présentent ainsi les activités les plus élevées de toutes les parties de plantes.

En effet, seule une partie de l'activité déposée sur les feuilles est transférée aux autres organes ou parties de la plante (fruits, grains, racines et tubercules).

Les radionucléides se transfèrent aux animaux essentiellement par ingestion de denrées. L'intensité des transferts vers les produits animaux (lait, viande et œuf) varie en fonction du produit et du radionucléide.



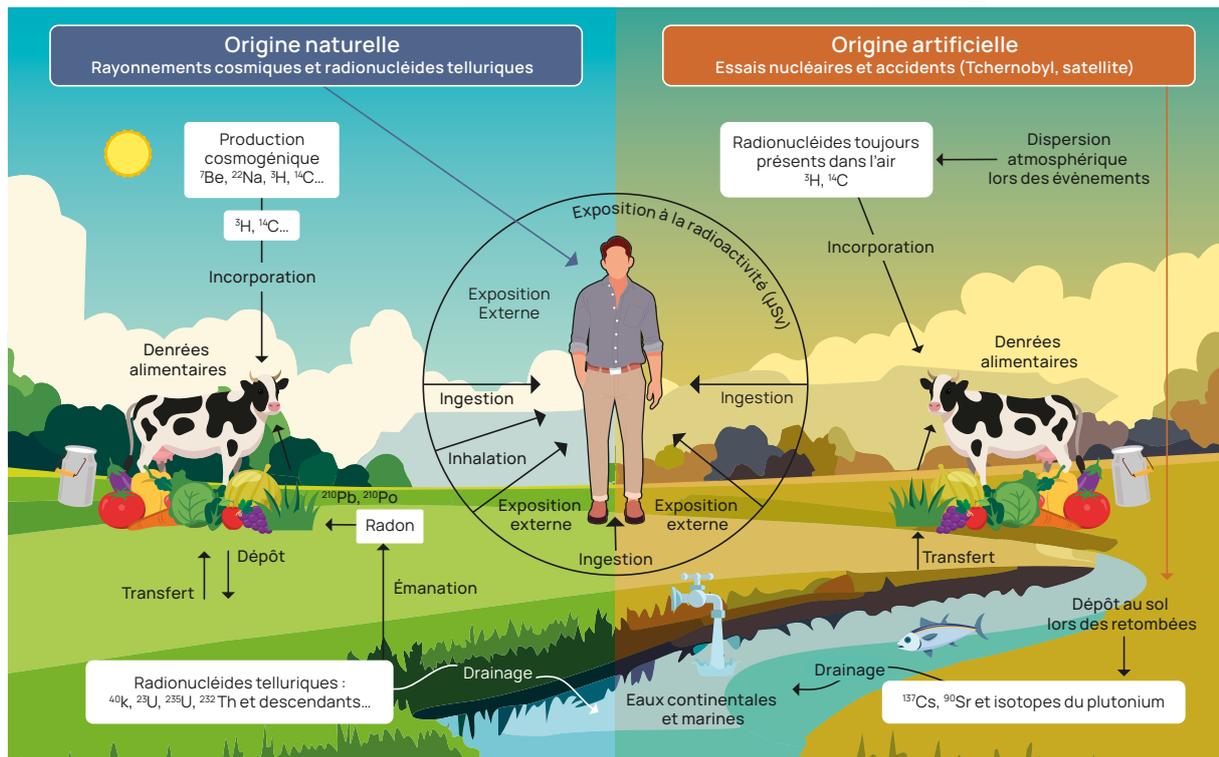
© Gilles Deschamps/Signatures/
Médiathèque IRSN

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

1.3. Le « bruit de fond » radiologique en France métropolitaine

On désigne par « bruit de fond radiologique », les activités des différents radionucléides, d'origine naturelle et artificielle, présents dans l'environnement, en dehors de toute influence anthropique actuelle (industrie nucléaire, autres industries, rejets hospitaliers...) ainsi que l'exposition qui en résulte.

ORIGINES DES EXPOSITIONS LIÉES AU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE ACTUEL



1. L'exposition externe au rayonnement cosmique

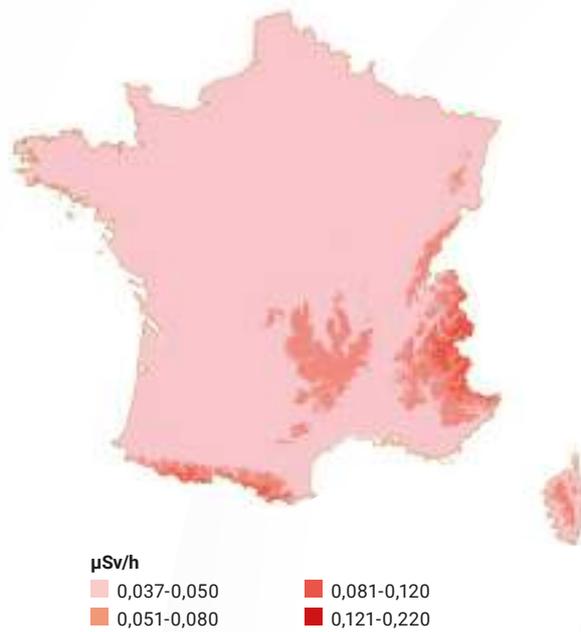
Le **rayonnement cosmique** primaire vient des étoiles, notamment du soleil. Son interaction avec les atomes des hautes couches de l'atmosphère crée un rayonnement secondaire. Tous ces rayonnements conduisent à un débit de dose dans l'air exprimé en $\mu\text{Sv/h}$.



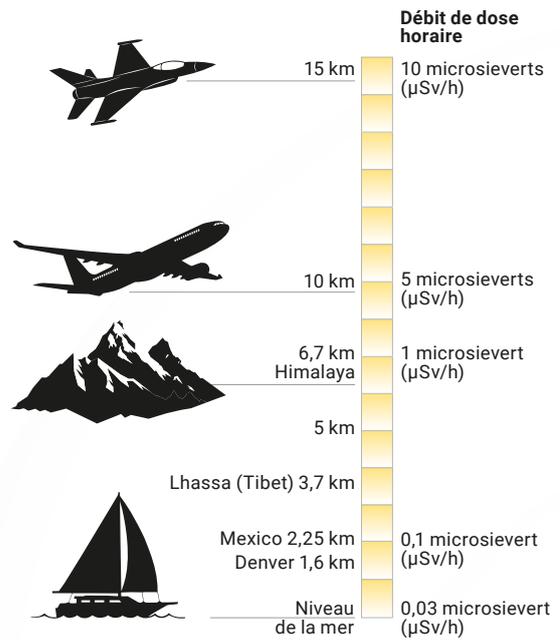
Le rayonnement cosmique est atténué par l'atmosphère. Il dépend donc fortement de l'altitude et dans une moindre mesure de la latitude, car il est dévié par le champ magnétique terrestre, mais au niveau de la métropole, cet effet est négligeable.



CARTE DU DÉBIT DE DOSE DANS L'AIR INDUIT PAR LE RAYONNEMENT COSMIQUE ($\mu\text{Sv/h}$)

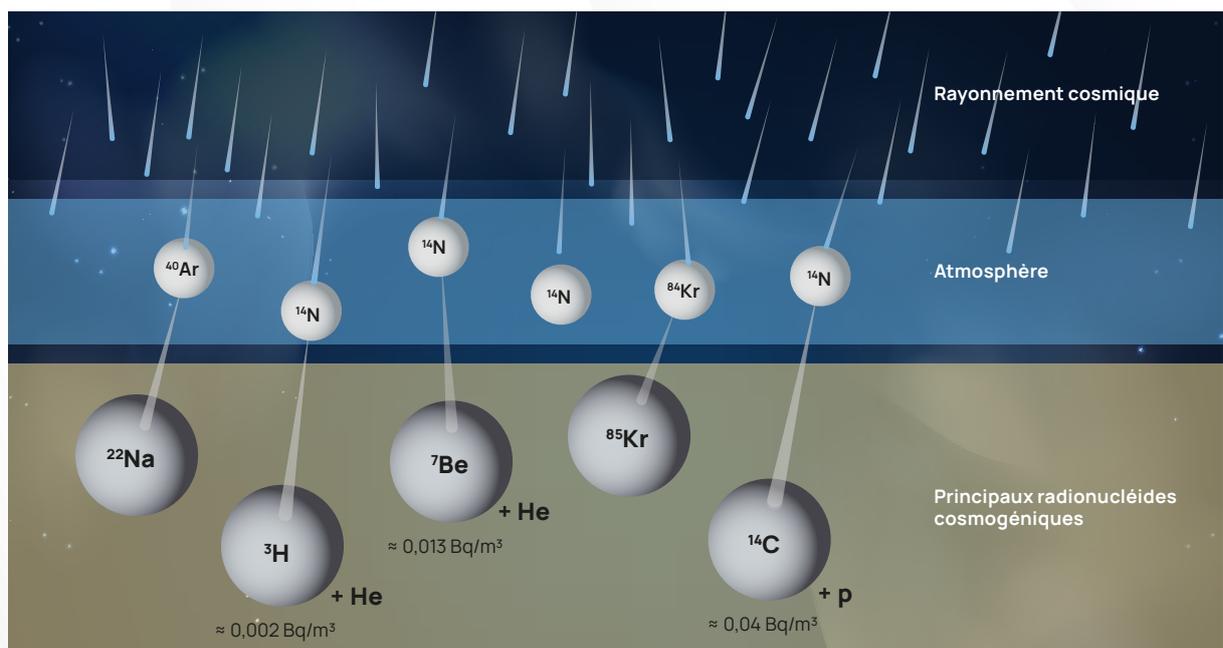


ÉVOLUTION DU DÉBIT DE DOSE GAMMA AMBIANT AVEC L'ALTITUDE ($\mu\text{Sv/h}$)



2. Les radionucléides cosmogéniques

Les **interactions** des **rayonnements cosmiques** avec les noyaux des **atomes** présents dans l'**atmosphère** produisent des radionucléides cosmogéniques.

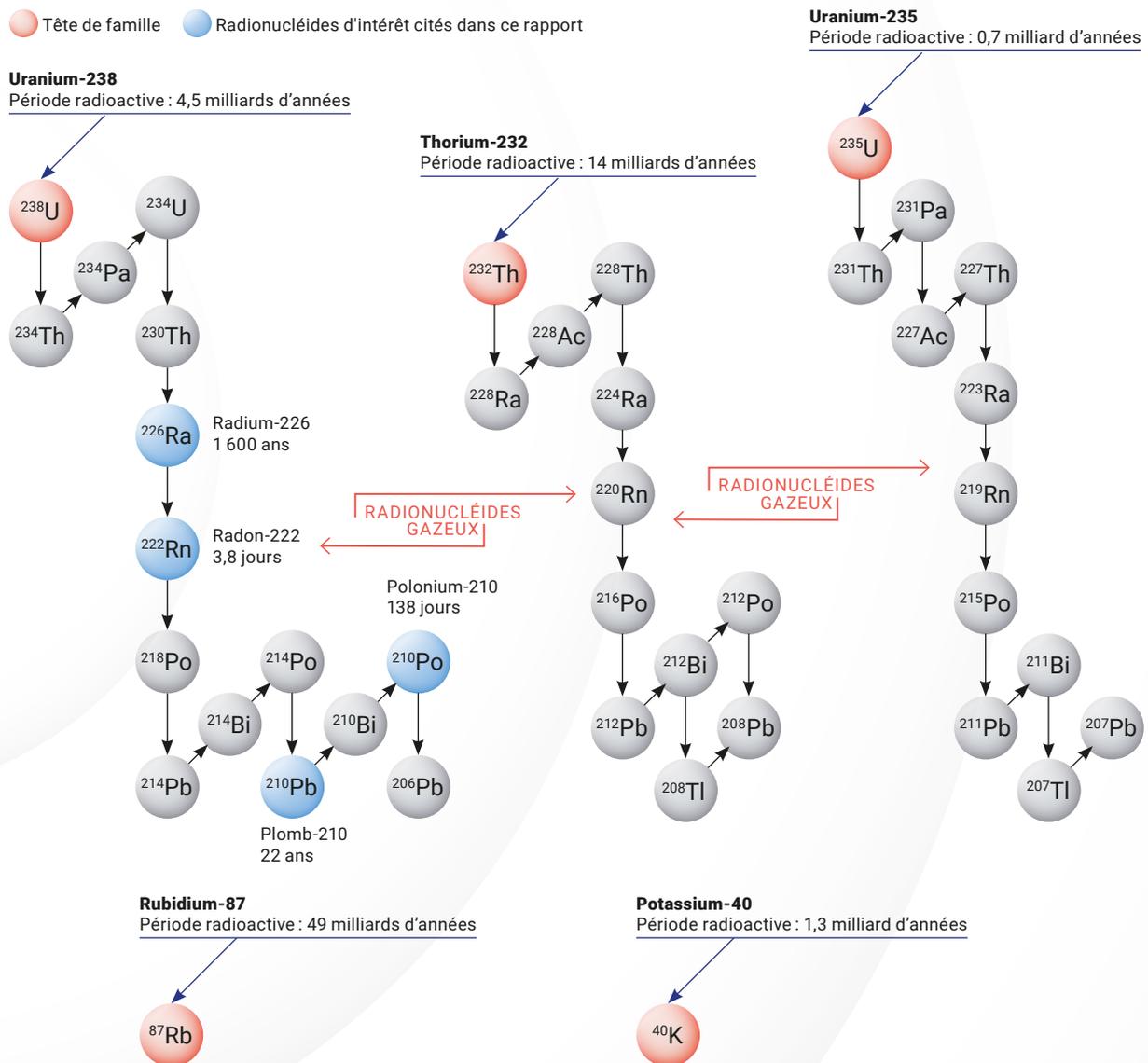


3. Les radionucléides telluriques

En raison de leur très longue période radioactive, **5 radionucléides sont présents sur Terre depuis sa formation** (en rose). 3 de ces 5 radionucléides produisent par désintégration 36 radionucléides qui ont des périodes radioactives allant de moins d'une seconde à plusieurs milliers d'années. Les radionucléides d'une même chaîne de désintégration sont parfois considérés, en première approche, comme étant à l'équilibre (ayant la même activité) dans les sols.

Cet « équilibre » peut être rompu en raison, d'une part, de conditions physico-chimiques, ainsi, des activités en radium (Ra) 2 fois supérieures à celles de l'uranium peuvent être observées et, d'autre part, en raison de l'émanation dans l'air du radon (Rn), radionucléide gazeux, ainsi, le ^{210}Pb émis dans l'air se redépote à la surface du sol qui se trouve ainsi « enrichie ».

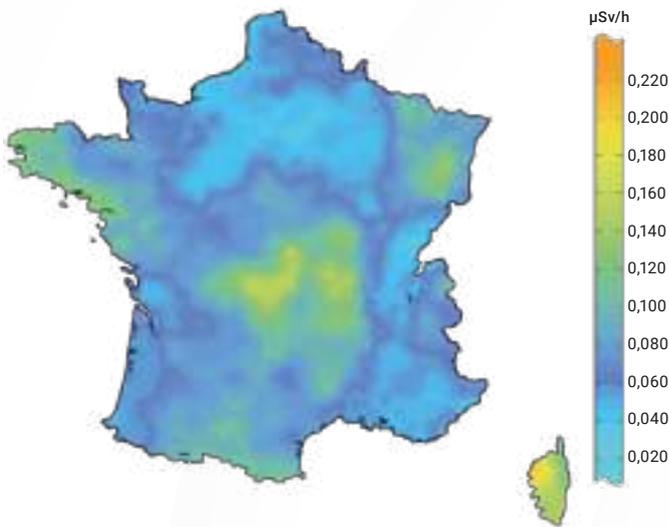
CHAÎNES DE DÉSINTÉGRATION DE L'URANIUM-238, DU THORIUM-232 ET DE L'URANIUM-235



Dans l'uranium naturel, l'activité de ^{235}U est 20 fois plus faible que celle de ^{238}U .
Un rapport d'activités ($^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$) différent témoigne d'un enrichissement ou d'un appauvrissement.

4. L'exposition au rayonnement tellurique

CARTE DES DÉBITS DE DOSE GAMMA TELLURIQUE ÉTABLIE À PARTIR DE DOSIMÈTRES TÉMOINS

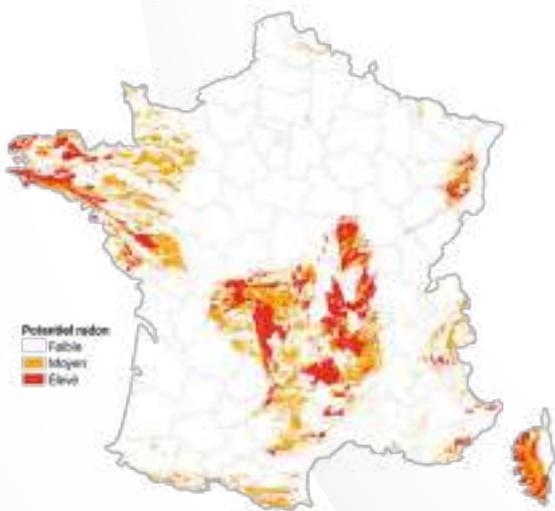


Certains de ces radionucléides telluriques ou issus des chaînes de désintégration, sont des **émetteurs gamma à l'origine du rayonnement tellurique** et de l'exposition externe qui en résulte.

5. Le radon

Le radon est un gaz radioactif produit par la désintégration du radium dans les sols et roches sous-jacentes, qui émane dans l'air. Le radon existe sous trois isotopes (^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn) mais seul le radon-222 présente une demi-vie suffisamment longue (3,8 jours) pour permettre d'observer des activités volumiques non négligeables dans l'environnement en fonction de la nature géologique des sols. La désintégration du radon dans l'air donne successivement naissance à 7 radionucléides « solides » qui se fixent aux particules en suspension dans l'air.

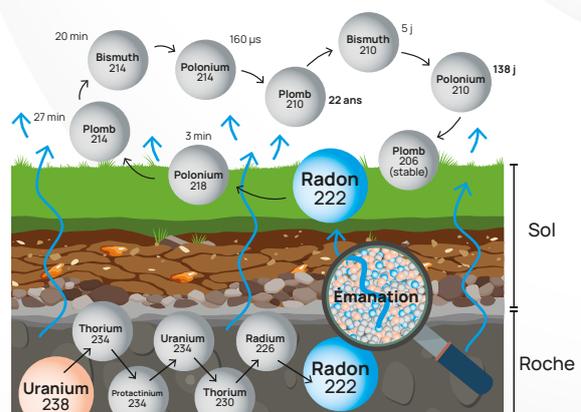
CARTE DU POTENTIEL RADON DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES À L'ÉCHELLE 1 : 1 000 000



Le potentiel radon est plus élevé là où les teneurs en uranium et thorium dans les sols sont les plus importantes (régions granitiques : Massif central, Bretagne, Corse, parties des Vosges et de la Savoie). Il est plus faible dans les sols d'origine sédimentaire (bassins parisien et aquitain, majeure partie de l'est du pays).

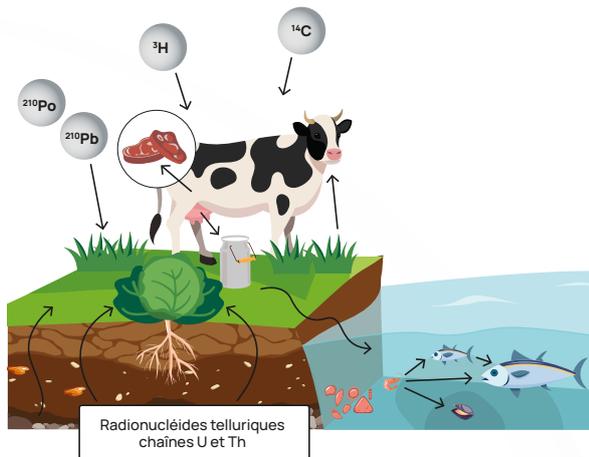
La teneur en radon de l'air extérieur va de quelques Bq/m³ à plusieurs dizaines de Bq/m³ et dépend :

- de la teneur en radium du sol et du sous-sol ;
- de la porosité, perméabilité, et humidité du sol et du sous-sol ;
- de la pression atmosphérique, de la température et des précipitations.



L'émanation du ^{222}Rn dans l'air et sa concentration à l'intérieur des habitations mal ventilées/aérées est à l'origine de la plus importante exposition du public à la radioactivité d'origine naturelle.

6. L'exposition par ingestion de radionucléides naturels



Les **radionucléides telluriques** sont transférés aux végétaux par absorption racinaire. Ils sont aussi transférés aux feuilles par remise en suspension de particules de sols (ou éclaboussures). Le plomb-210 et le polonium-210 provenant du radon dans l'air se déposent à la surface des feuilles.

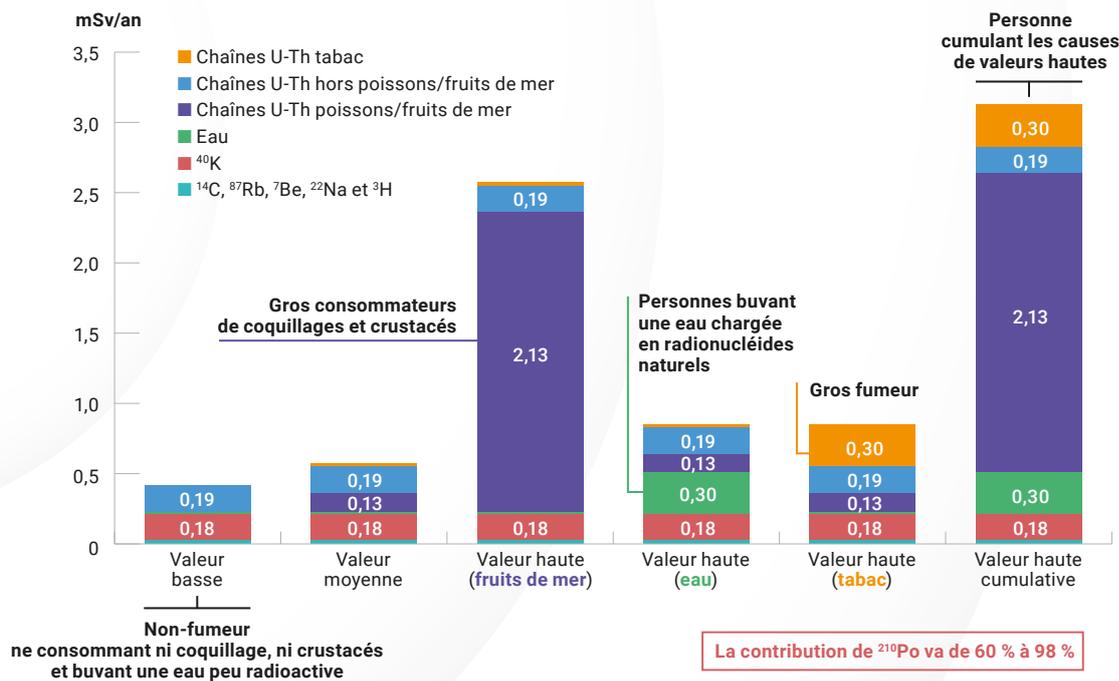
Les **radionucléides cosmogéniques** se déposent sur les feuilles des végétaux (^{22}Na , ^7Be ...) ou sont absorbés lors de leur croissance (^3H et ^{14}C) via la photosynthèse principalement.

Les radionucléides présents dans les végétaux sont ingérés par les animaux, puis sont transférés à leurs produits (lait, viande, œuf...).

Les eaux continentales reçoivent les radionucléides telluriques par drainage des sols. Ils sont ensuite transférés dans la chaîne alimentaire aquatique.

Les mollusques et les crustacés présentent des activités massiques de polonium-210 nettement plus élevées que celles des autres denrées. Le polonium-210 se dépose aussi sur les feuilles de tabac ; le tabagisme induit donc une exposition par inhalation de ce radionucléide.

DOSES EFFICACES DUES À L'INGESTION DE RADIONUCLÉIDES NATURELS EN FRANCE MÉTROPOLITAINE



En raison d'activités plus élevées dans les denrées et/ou d'une plus forte radiotoxicité, le ^{210}Po , le ^{40}K , le ^{210}Pb et dans une moindre mesure le ^{228}Ra et le ^{226}Ra , sont les principaux contributeurs à l'exposition par incorporation de radionucléides naturels. Pour les consommateurs de fruits de mer, la contribution de ^{210}Po dépasse 60 % et peut atteindre 98 %.

La concentration en potassium (K) de l'organisme (ou kaliémie) est maintenue constante par l'organisme humain. La portion de potassium-40 dans le potassium total (Bq/kg de K) est également constante. Donc, l'activité corporelle de potassium-40 est également constante (4 000 à 5 000 Bq/personne) et conduit à une dose efficace de l'ordre de 170 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un adulte et 185 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un enfant (source : UNSCEAR). Pour les mêmes raisons, l'activité de carbone-14 d'une personne est constante et conduit à une dose efficace annuelle de l'ordre de 12 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

7. Les radionucléides artificiels rémanents des retombées globales

ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES D'ARMES NUCLÉAIRES

543 essais nucléaires atmosphériques ont été effectués par les États-Unis, l'URSS, la Grande-Bretagne, la Chine et la France entre 1945 et 1980. La France métropolitaine se trouve dans la gamme de latitudes la plus touchée par les retombées troposphériques et stratosphériques des essais nucléaires.

DÉSINTÉGRATION DU SATELLITE SNAP-9

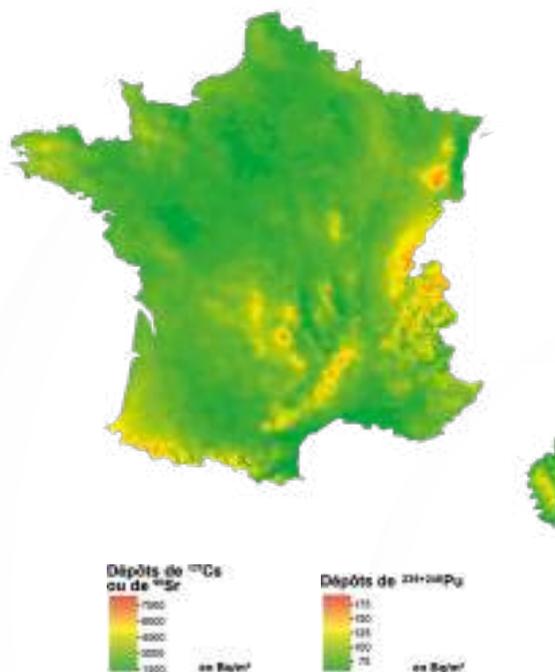
En 1964, un satellite américain (SNAP9-A) alimenté au plutonium-238 se désintègre au-dessus de l'océan Indien libérant 2 fois plus de ce radionucléide que l'ensemble des essais nucléaires ; 20 % de ces retombées se font dans l'hémisphère nord.



Une vingtaine de radionucléides ont été les principaux contributeurs à l'exposition de la population liée aux retombées des essais nucléaires et à la désintégration du satellite.

Aujourd'hui, il n'en subsiste principalement que neuf dans l'environnement (^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am).

DÉPÔTS DE CÉSIIUM-137, DE STRONTIUM-90 ET DE PLUTONIUM-239+240 AU TERME DES ESSAIS NUCLÉAIRES ATMOSPHÉRIQUES



DÉPÔTS AU SOL DE CÉSIIUM-137, VENANT DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL (mai 1986)



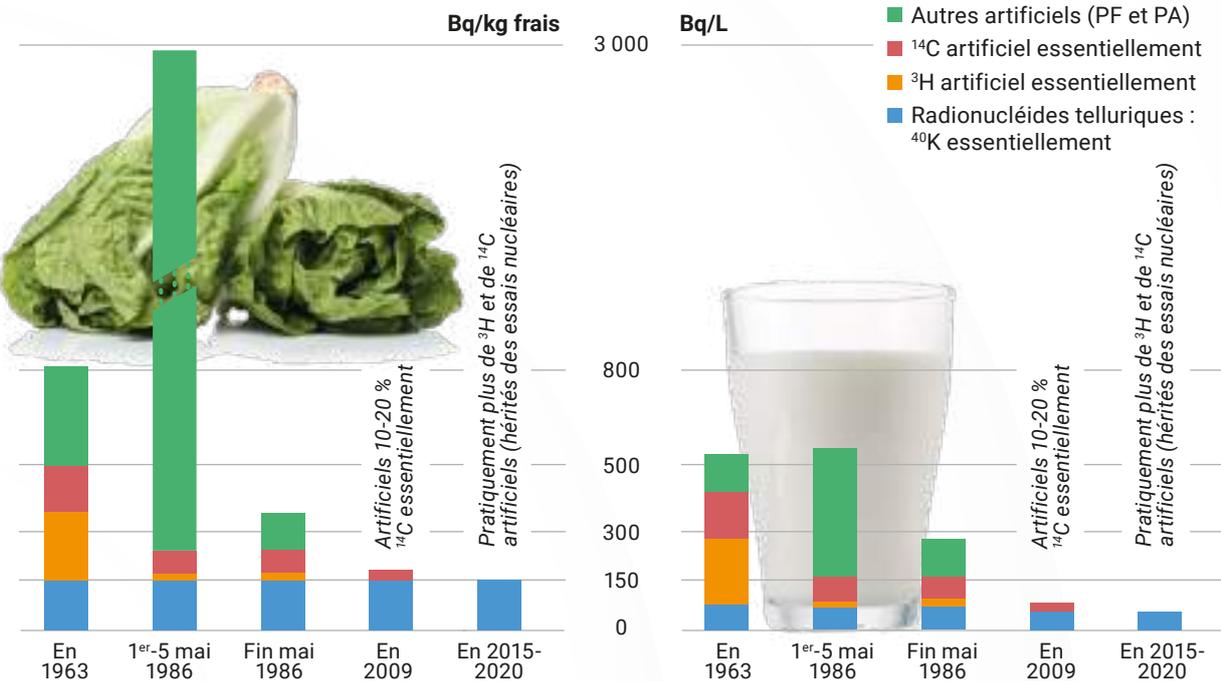
RETOMBÉES DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

Les masses d'air contaminées par l'accident de Tchernobyl ont principalement affecté la France 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 y ont été plus importants que dans le reste du pays et très hétérogènes. Parmi la dizaine de radionucléides décelés dans l'air et dans des végétaux, les trois principaux ont été l'iode-131 et les césium-134 et césium-137.

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, césium-134 et césium-137 ont été détectées de fin mars jusqu'en mai 2011 dans l'air, les eaux de pluie et dans quelques denrées (légumes feuilles, lait...) avec des activités de 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.

ORIGINES ET NIVEAUX DE RADIOACTIVITÉ DANS LES DENRÉES PRODUITES EN FRANCE À DIFFÉRENTES PÉRIODES (Bq/kg frais ou Bq/L)



Si les activités des radionucléides naturels (en bleu) dans les denrées sont constantes dans le temps, celles des radionucléides artificiels ont fortement évolué depuis 1945 comme l'illustrent les exemples des salades et du lait produits en France.

En 1963, au plus fort de retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires, les radionucléides artificiels étaient nettement prédominants ; outre les produits de fission mentionnés précédemment, le tritium et le carbone-14 étaient principalement d'origine artificielle.

Les activités les plus élevées en radionucléides artificiels, notamment en iodes radioactifs, ont été observées durant les retombées de l'accident de Tchernobyl entre le 1^{er} et le 5 mai 1986. Fin mai 1986, elles avaient déjà fortement baissé.

Aujourd'hui, les radionucléides artificiels ne représentent plus qu'une très faible part de la radioactivité des denrées ; même le tritium et le carbone-14 sont maintenant principalement d'origine naturelle (cosmogénique).



Prélèvement de salades

© Gilles Salaün/IRSN

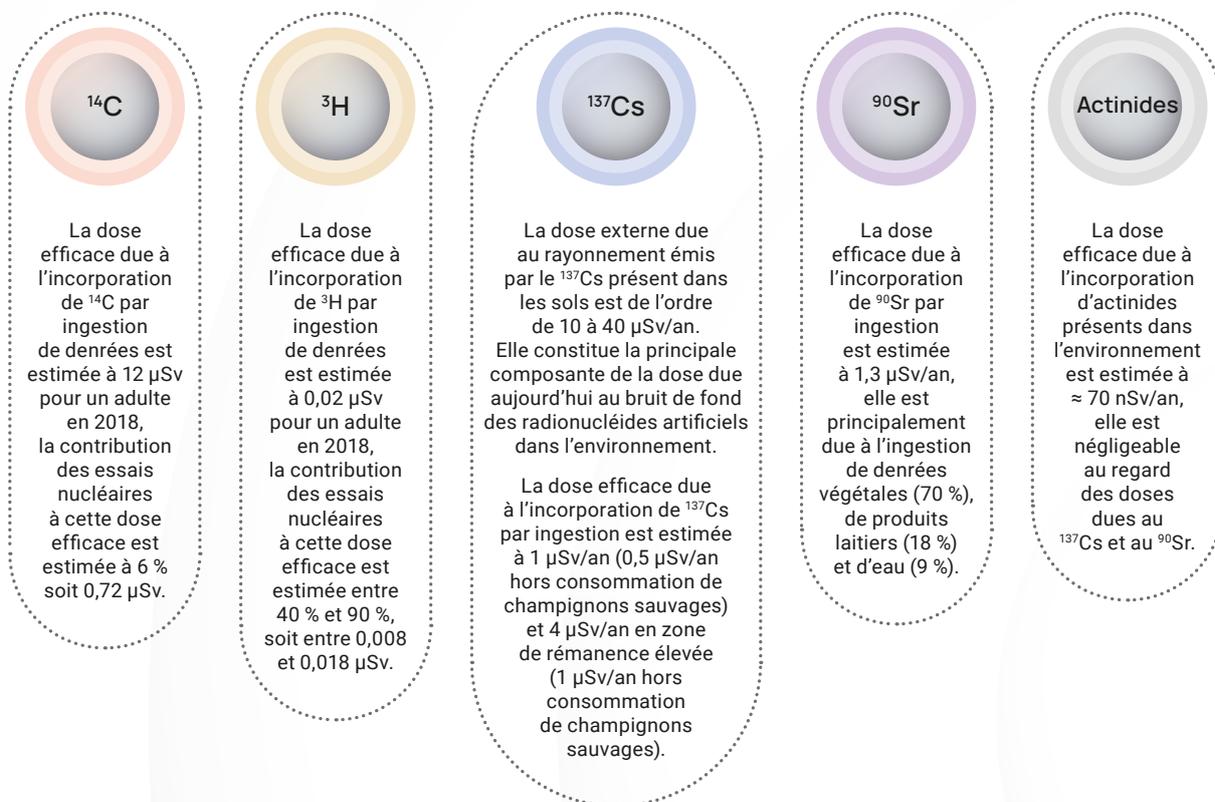


Prélèvement de lait

© Amaud Bouissou/MEDDE/Médiathèque IRSN

8. La rémanence actuelle des retombées globales de radionucléides d'origine artificielle et les expositions associées

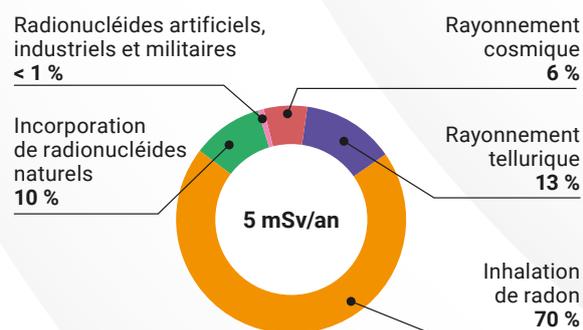
(données acquises sur la période 2008-2018)



9. Bilan de l'exposition annuelle des Français au bruit de fond radiologique (2014-2019)

La dose moyenne due au bruit de fond radiologique environnementale est estimée à 5 mSv/an. Elle résulte principalement de l'inhalation de radon. Les expositions dues à la radioactivité artificielle liées à la rémanence des retombées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl ainsi qu'aux rejets des installations nucléaires ne représentant que moins de 1 % de cette valeur. Cette valeur moyenne cache une grande variabilité liée au lieu de résidence et aux habitudes des personnes.

DOSES EFFICACES POUR UN ADULTE LIÉES AU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS MÉTROPOLITAIN



Ainsi, une personne résidant dans un bassin sédimentaire comme le bassin parisien ou aquitain, ou encore une vallée fluviale, ne consommant pas de fruits de mer, ne fumant pas et ne prenant pas l'avion, recevrait une dose de 2,4 mSv/an. À l'inverse une personne résidant sur un massif ancien (massifs central, armoricain ou vosgien) dont les sols sont plus riches en uranium, gros fumeur, consommant beaucoup de fruits de mer et prenant très fréquemment l'avion, pourrait recevoir une dose de 13 mSv/an.

Pour en savoir plus : <https://www.irsn.fr/actualites/lirsn-dresse-bilan-lexposition-population-francaise-rayonnements-ionisants>

Pour personnaliser l'estimation de l'exposition individuelle au-delà de ces illustrations, l'IRSN met à disposition du public un outil permettant à chacun d'estimer au mieux sa propre exposition. Cet outil est disponible sur internet : <https://expop.irsn.fr/>

1.4. Les gammes d'activités du bruit de fond radiologique

Les figures suivantes présentent les activités des principaux radionucléides qui contribuent au bruit de fond radiologique métropolitain. Il s'agit soit de radionucléides naturels, soit de radionucléides rémanents des retombées anciennes.



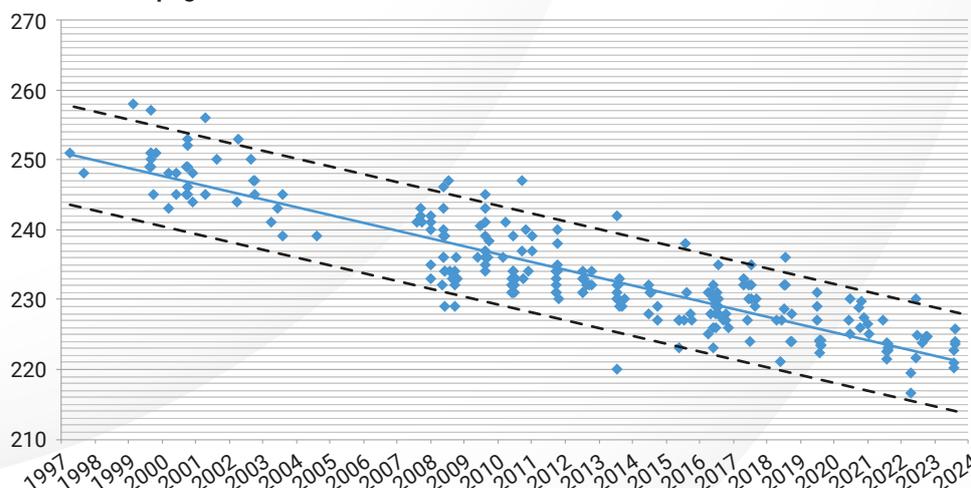
Certaines représentations sont schématisées sous forme de « **boîte à moustaches** » telles que décrites en chapitre d'annexes (chapitre 5). Ces valeurs statistiques, calculées à partir de données acquises par l'IRSN dans différents cadres, sont représentatives des mesures effectuées par l'IRSN et ne constituent qu'une approche de la réalité. Particulièrement, seuls les résultats de mesure significatifs, c'est-à-dire supérieurs aux seuils de décision métrologiques, ont été pris en compte ; les activités environnementales les plus faibles, non quantifiables, ne sont pas représentées. C'est pourquoi, les « boîtes à moustaches » ne comportent pas de valeurs minimales.

De manière générale, la représentativité de ces statistiques est d'autant plus réaliste que le nombre de données est important. À titre d'information, le nombre de résultats significatifs exploités (n) sur le nombre d'analyses réalisées est fourni pour chaque série de données au niveau de l'axe des abscisses (exemple : 10n/20). Par ailleurs, de manière à fournir l'information la plus complète possible, le choix a été fait de présenter une « boîte à moustaches », même si le nombre de données disponibles est très restreint, dès lors que les indicateurs statistiques paraissent réalistes. Cette représentation est appliquée si le nombre de résultats supérieurs aux seuils de décision dépasse 50 % du nombre de résultats disponibles et si le nombre de résultats significatifs est supérieur ou égal à 5. Dans le cas contraire le choix a été fait de représenter, à titre indicatif, la gamme de variation des résultats significatifs disponibles sous forme de dégradé monochrome.

Enfin, il est important de souligner que des valeurs supérieures aux valeurs maximum présentées peuvent toujours être mesurées.

ÉVOLUTION RÉCENTE DES ACTIVITÉS DE CARBONE-14 DANS LES COMPARTIMENTS ATMOSPHÉRIQUE ET TERRESTRE HORS INFLUENCE D'INSTALLATIONS NUCLÉAIRES (Bq/kg de carbone)

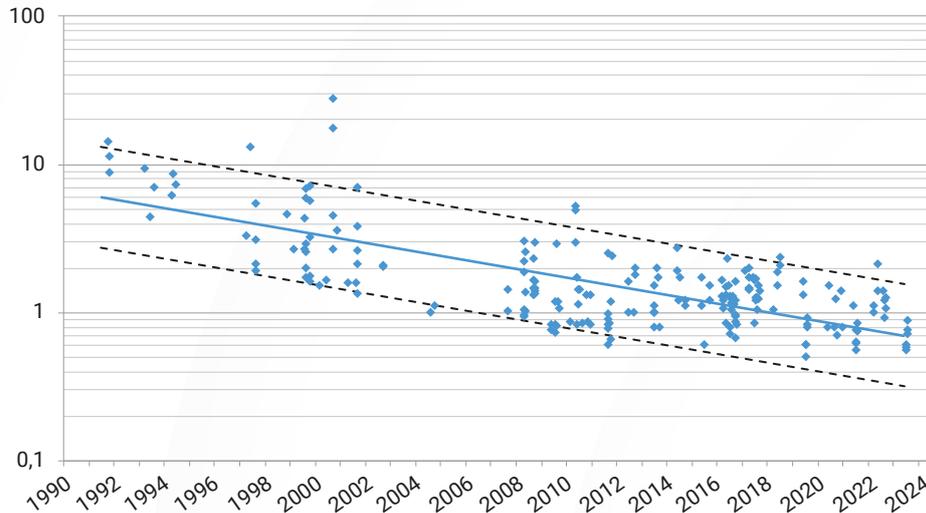
Carbone-14 en Bq/kg de carbone



Année	Valeurs de référence
1994	255 ± 7
1995	254 ± 7
1996	253 ± 7
1997	251 ± 7
1998	250 ± 7
1999	249 ± 7
2000	248 ± 7
2001	246 ± 7
2002	245 ± 7
2003	244 ± 7
2004	243 ± 7
2005	241 ± 7
2006	240 ± 7
2007	239 ± 7
2008	238 ± 7
2009	237 ± 7
2010	235 ± 7
2011	234 ± 7
2012	233 ± 7
2013	232 ± 7
2014	231 ± 7
2015	230 ± 7
2016	228 ± 7
2017	227 ± 7
2018	226 ± 7
2019	225 ± 7
2020	224 ± 7
2021	223 ± 7
2022	222 ± 7
2023	221 ± 7

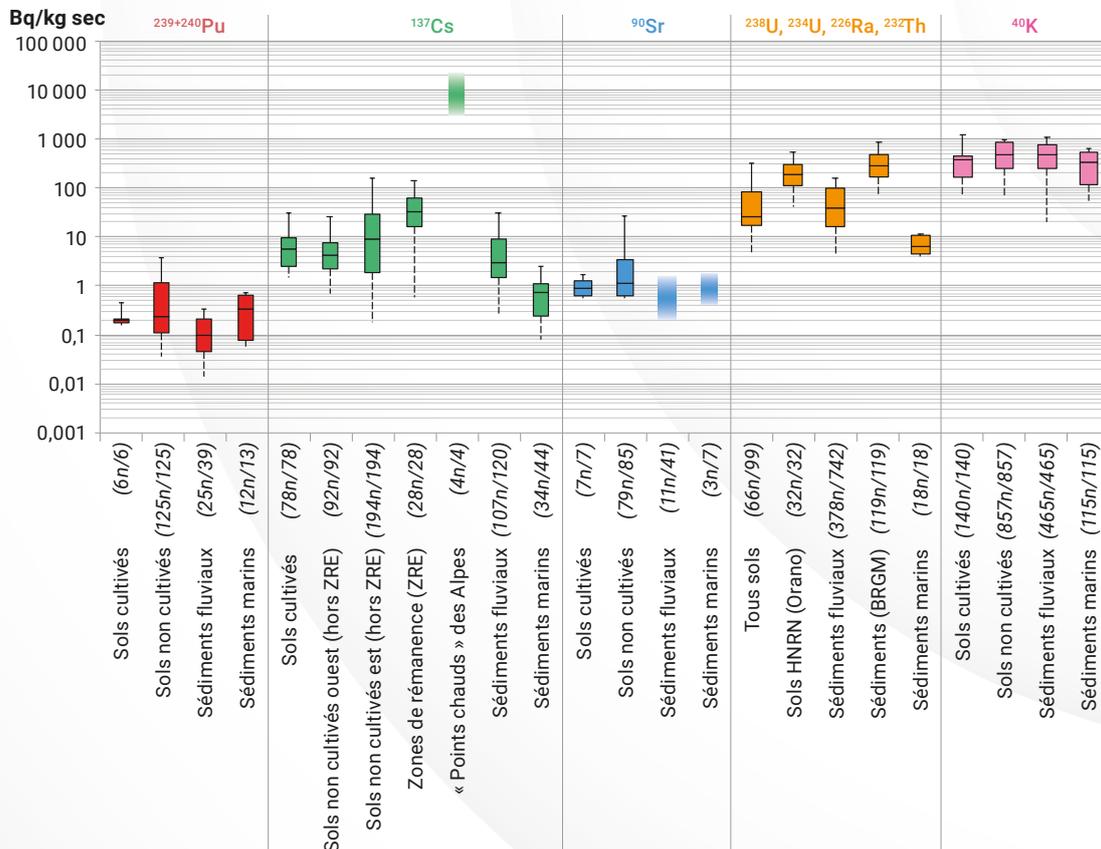
ÉVOLUTION RÉCENTE DES ACTIVITÉS DE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ (TOL) DANS LE COMPARTIMENT TERRESTRE HORS INFLUENCE D'INSTALLATIONS NUCLÉAIRES (Bq/L d'eau de combustion)

Tritium Organiquement Lié (TOL) en Bq/L d'eau de combustion



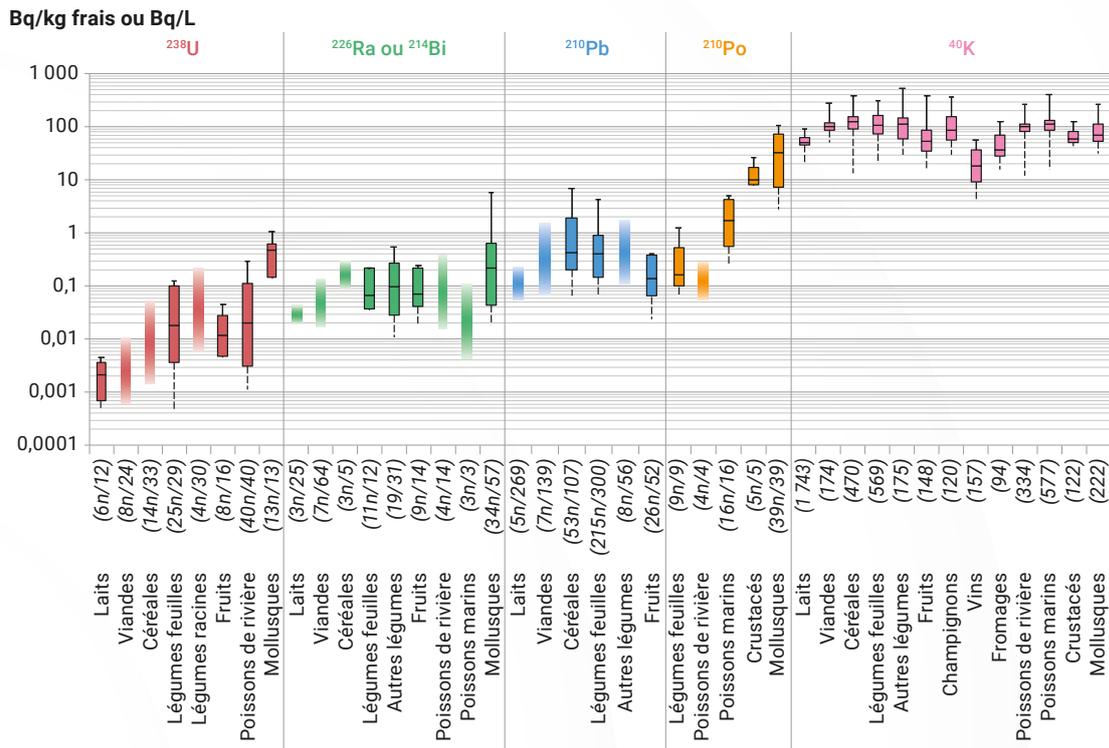
Année	Valeurs de référence et gamme de variation	
1991	6,0	(2,8 - 13)
1992	5,7	(2,6 - 12)
1993	5,3	(2,4 - 12)
1994	4,9	(2,2 - 11)
1995	4,6	(2,1 - 10)
1996	4,3	(2,0 - 10)
1997	4,0	(1,8 - 8,9)
1998	3,8	(1,7 - 8,3)
1999	3,5	(1,6 - 7,8)
2000	3,3	(1,5 - 7,3)
2001	3,1	(1,4 - 6,8)
2002	2,9	(1,3 - 6,4)
2003	2,7	(1,2 - 5,9)
2004	2,5	(1,2 - 5,6)
2005	2,4	(1,1 - 5,2)
2006	2,2	(1,0 - 4,9)
2007	2,1	(0,94 - 4,5)
2008	1,9	(0,88 - 4,2)
2009	1,8	(0,82 - 3,9)
2010	1,7	(0,77 - 3,7)
2011	1,6	(0,72 - 3,5)
2012	1,5	(0,67 - 3,2)
2013	1,4	(0,63 - 3,0)
2014	1,3	(0,59 - 2,8)
2015	1,2	(0,55 - 2,7)
2016	1,1	(0,51 - 2,5)
2017	1,1	(0,48 - 2,3)
2018	1,0	(0,45 - 2,2)
2019	0,9	(0,42 - 2,0)
2020	0,9	(0,39 - 1,9)
2021	0,8	(0,37 - 1,8)
2022	0,8	(0,34 - 1,7)
2023	0,7	(0,32 - 1,6)

ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES DANS LES SOLS ET LES SÉDIMENTS FRANÇAIS (Bq/kg sec)



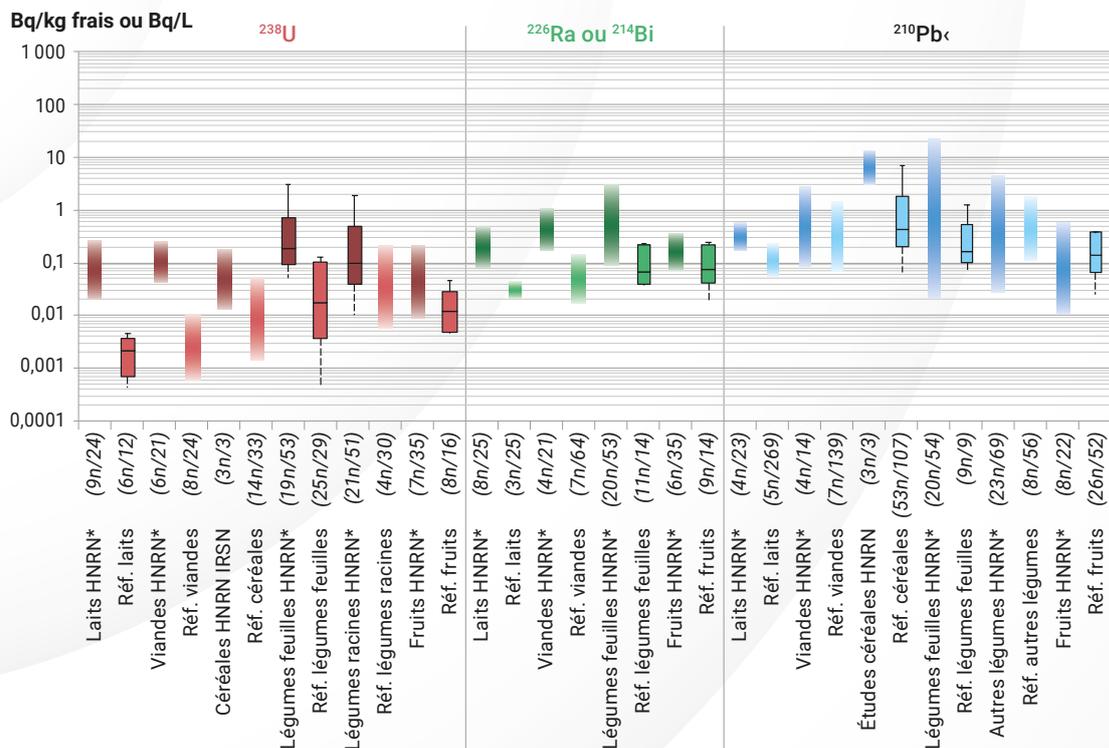
Données IRSN : 2009-2023. ZRE : zone de rémanence élevée. HNRN : haut niveau de radioactivité naturelle.

**ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES NATURELS DANS LES DENRÉES PRODUITES EN FRANCE
(Bq/kg frais ou Bq/L)**



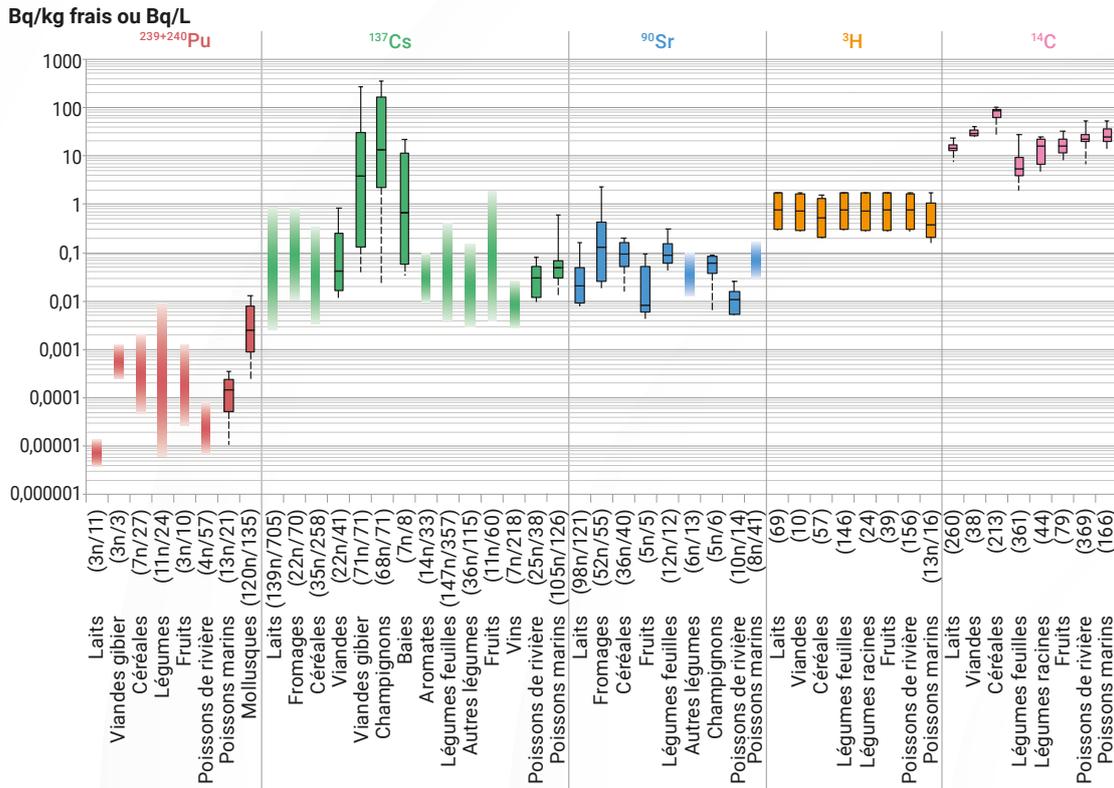
Données IRSN : 2010-2023 (sauf ²³⁸U dans les poissons et mollusques : 2000-2023).

COMPARAISON DES ACTIVITÉS (Bq/kg frais ou Bq/L) DANS CERTAINES DENRÉES PRODUITES SUR DES ZONES À HAUT NIVEAU DE RADIOACTIVITÉ NATURELLE (HNRN principalement de Haute-Vienne et de Saône-et-Loire) AVEC CELLES PRODUITES PRINCIPALEMENT EN ZONES SÉDIMENTAIRES (bassins parisiens, aquitains, vallées fluviales...)



Données IRSN : 2010-2023.
* Données Orano : 1991-2008.

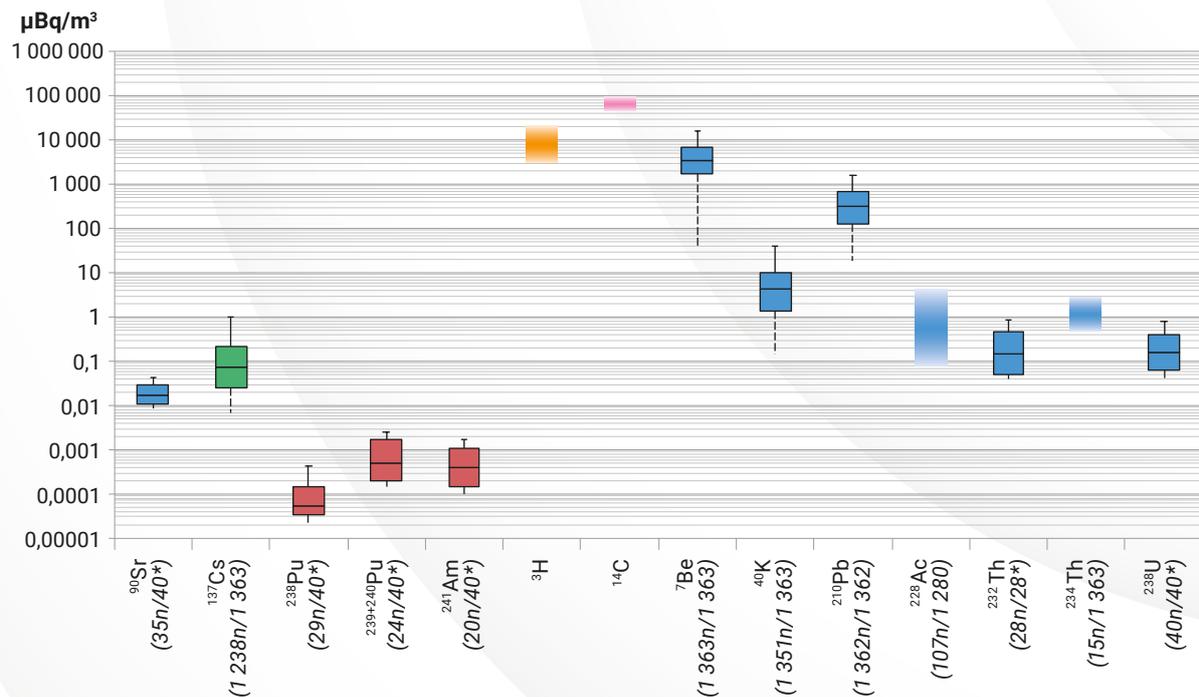
ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS, DU TRITIUM ET DU CARBONE-14 DANS LES DENRÉES PRODUITES EN FRANCE (Bq/kg frais ou Bq/L)



Données IRSN : 2014 à 2023 (quelques séries 2000-2023).

Gammes d'activités de ^3H et ^{14}C déduites des gammes de bruits de fond sur 2021-2023.

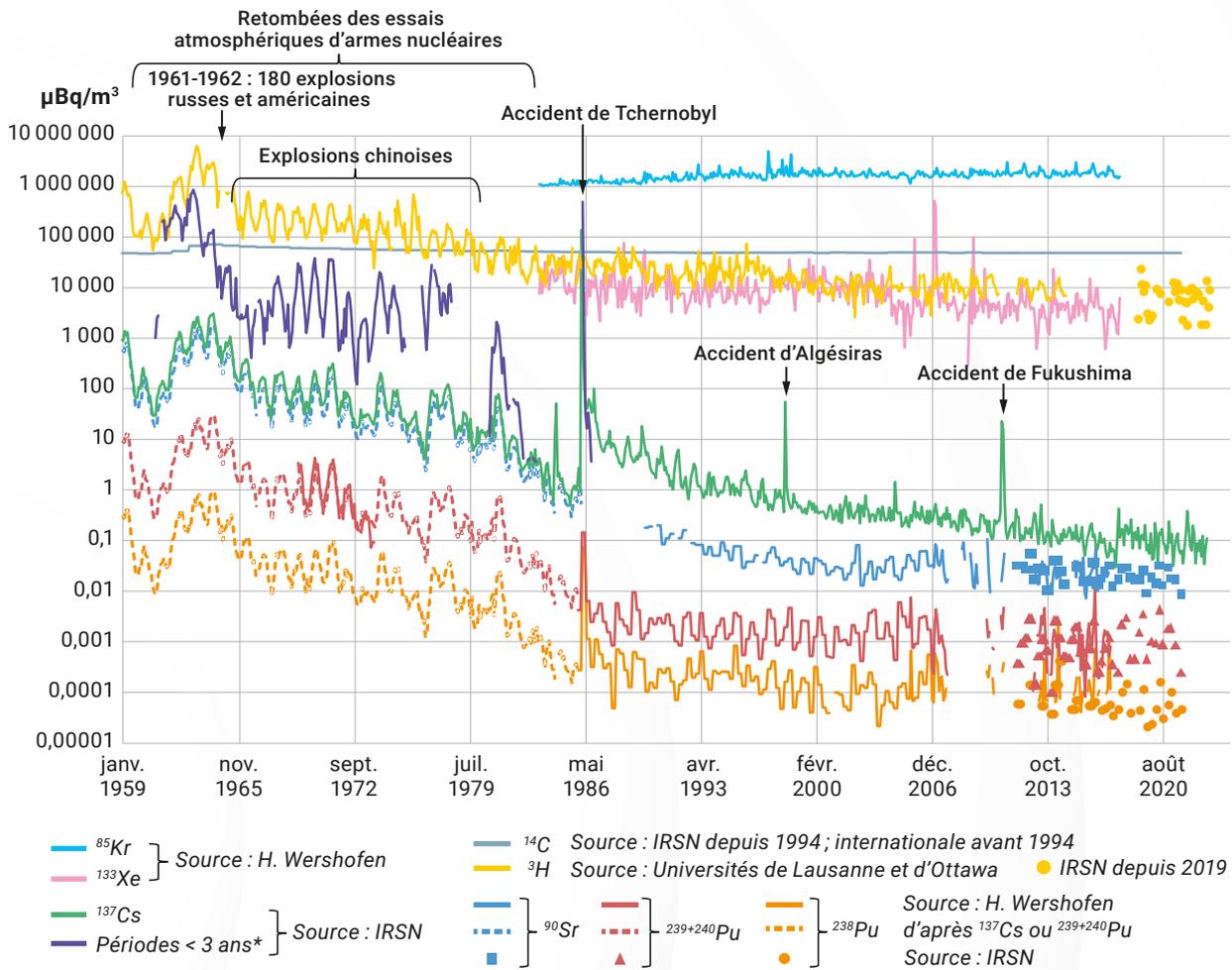
ACTIVITÉS DE QUELQUES RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS ET NATURELS MESURÉS DANS L'AIR EN FRANCE ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)



Données IRSN : 2021-2023 pour le ^3H et ^{14}C , 2019-2023 pour les radionucléides émetteurs gamma, 2014-2023 pour les autres radionucléides.

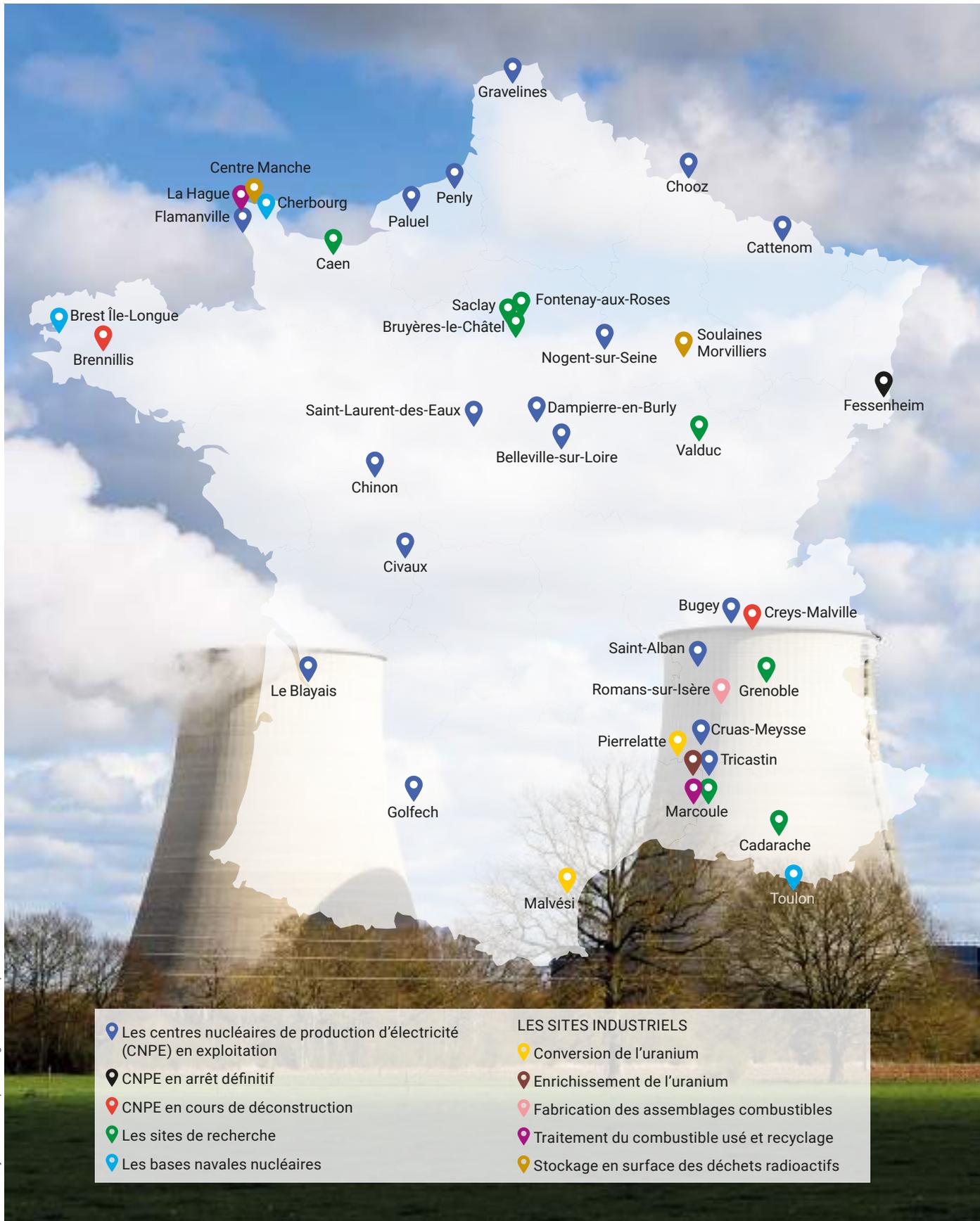
* Station OPERA-Air de l'OPE Andra/IRSN d'Houdelaincourt.

ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS MESURÉS DANS L'AIR EN FRANCE ET EN ALLEMAGNE AU COURS DES 60 DERNIÈRES ANNÉES ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)



* Radionucléides de périodes inférieures à 3 ans : ^{131}I , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{103}Ru , ^{89}Sr , ^{91}Y , ^{95}Zr , ^{144}Ce , ^{54}Mn , ^{106}Ru , ^{55}Fe , ^{125}Sb , ^{134}Cs ...

Carte de localisation des sites nucléaires français, avec en fond la centrale de Belleville-sur-Loire.



02

DONNÉES RELATIVES AUX DIFFÉRENTS SITES NUCLÉAIRES FRANÇAIS

2.1. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ (CNPE) EN EXPLOITATION	32
Les rejets d'effluents radioactifs	33
Les plans de surveillance de l'environnement d'un CNPE	34
Influence des CNPE sur leur environnement et expositions du public associées	36
Influence des rejets d'effluents liquides tritiés	48
Influence des CNPE sur les activités de tritium dans les eaux de boisson	56
Influence des rejets liquides d'autres radionucléides	57
Conclusion générale	61
2.2. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN COURS DE DÉCONSTRUCTION OU MIS À L'ARRÊT DÉFINITIVEMENT	65
Le site de Creys-Malville	65
Le site de Brennilis	74
Le site de Fessenheim	80
2.3. LES SITES INDUSTRIELS	100
Le site de Malvézi	100
Le site Orano du Tricastin	111
Le site de Romans-sur-Isère	119
Le site de La Hague	124
Le centre de stockage de l'Aube et le centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage de Morvilliers	167
2.4. LES SITES DE RECHERCHE	173
Le site de Bruyères-le-Châtel	173
Le site de Cadarache	185
Le site du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds) à Caen	191
Le site CEA de Fontenay-aux-Roses	196
Centre CEA et Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble	203
Le site de Marcoule (Gard)	213
Le site de Saclay	226
Le site de Valduc	237
2.5. LES BASES NAVALES NUCLÉAIRES	247
Description	247
Les rejets radioactifs	249
La surveillance radiologique de l'environnement	249
Influence des sites sur l'environnement	252
2.6. SYNTHÈSE DOSIMÉTRIQUE	262

02

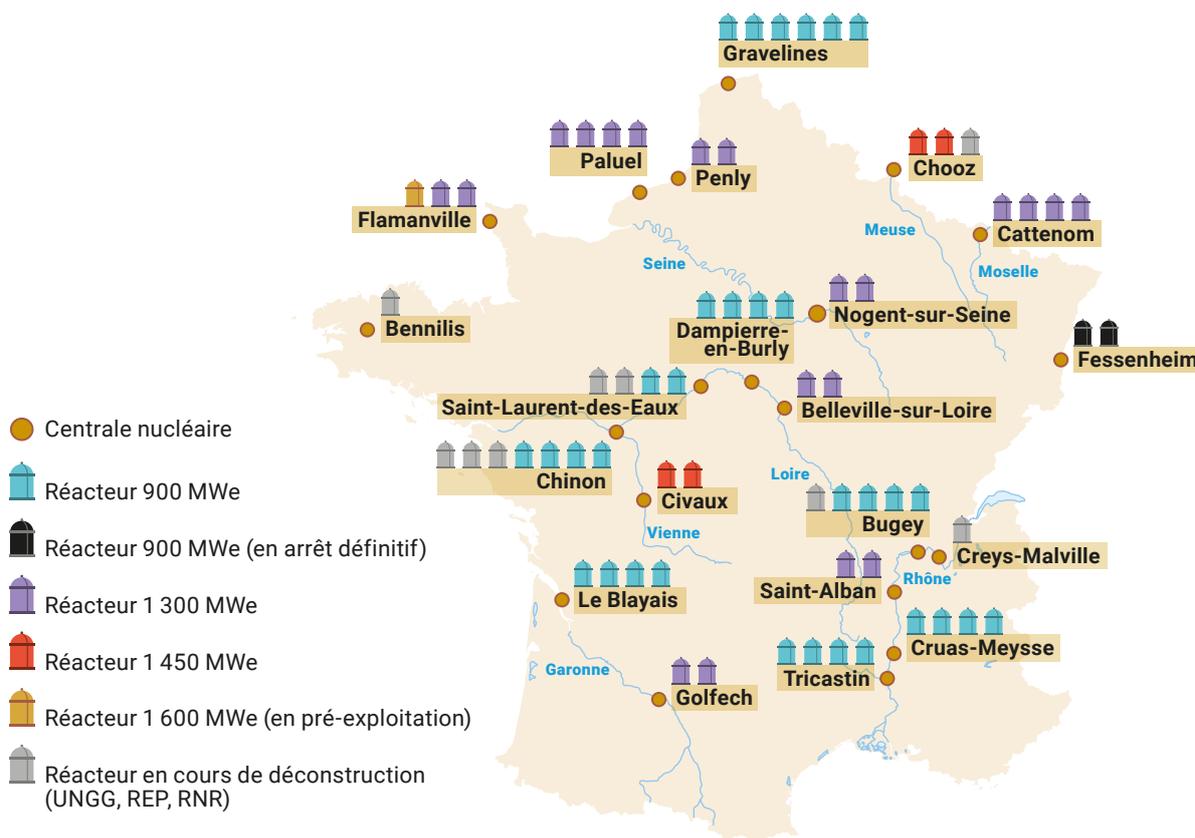
DONNÉES RELATIVES AUX DIFFÉRENTS SITES NUCLÉAIRES FRANÇAIS

2.1. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ (CNPE) EN EXPLOITATION

Dix-huit centres nucléaires de production d'électricité sont actuellement exploités en France par EDF SA, les deux réacteurs du CNPE de Fessenheim ayant été arrêtés en février et juin 2020.

Chaque CNPE comporte de 2 à 6 réacteurs pour un total de 56 réacteurs en exploitation : 32 réacteurs à eau pressurisée (REP) d'une puissance unitaire de 900 MWe, 20 réacteurs de 1 300 MWe et 4 réacteurs de 1 450 MWe (figure 1). Sur certains sites sont aussi implantées d'autres installations : des réacteurs en démantèlement (à Bugey, Chinon, Saint-Laurent-des-Eaux et Chooz), des ateliers et magasins...

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



Les rejets d'effluents radioactifs

Le fonctionnement d'un CNPE entraîne la production d'effluents radioactifs dont les limites et les modalités de rejet dans l'environnement sont encadrées par des autorisations propres à chaque centrale. Ces rejets sont effectués dans l'atmosphère, les fleuves ou la mer, après contrôle/surveillance des niveaux de radioactivité. Conformément à la réglementation, chaque CNPE dispose d'une autorisation spécifique encadrant notamment les limites et les modalités de rejets dans l'environnement des effluents liquides et gazeux dans l'air et dans l'eau du fleuve (ou de la mer) en bordure duquel il est implanté.

Les autorisations et les conditions de rejets fixées permettent d'assurer que dans toutes les plages et conditions de fonctionnement normal, y compris les plus pénalisantes, l'exposition du public reste inférieure à 1 mSv/an conformément à l'article

R. 1333-8 du code de la santé publique. Mais par application des principes d'optimisation et de limitation, les rejets réalisés par les exploitants sont inférieurs, voire très inférieurs aux limites de rejets accordées dans la plage de fonctionnement normal. Les tableaux 1 et 2 présentent, pour la période 2020-2022, les gammes (minimum et maximum) des rejets radioactifs atmosphériques et liquides réalisés par site en fonction du nombre et de la puissance des réacteurs composant le CNPE.

En termes d'activité rejetée, outre les gaz rares (xénon-131m, 133 et 135, argon-41 et surtout krypton-85, qui se trouvent exclusivement dans l'air et ne sont pas transférés dans les autres composantes de l'environnement en raison de leur caractère inerte sur le plan chimique), le tritium et le carbone-14 sont les radionucléides les plus abondants dans les rejets d'effluents aussi bien atmosphériques que liquides (tableaux 1 et 2).

TABLEAU 1 / GAMMES DES REJETS ANNUELS ATMOSPHÉRIQUES (min. et max.) (GBq/an)
POUR LA PÉRIODE 2020-2022 EN FONCTION DE LA PUISSANCE IMPLANTÉE SUR CHAQUE SITE

CNPE	Gaz rares	Tritium (³ H)	Carbone-14 (¹⁴ C)	Iodes	PF/PA*
Gravelines	1 314 - 1 361	1 635 - 1 758	700 - 1 320	0,063 - 0,07	0,005 - 0,013
Cattenom, Paluel	550 - 1 572	1 577 - 2 132	652 - 994	0,03 - 0,06	0,005 - 0,008
Bugey, Cruas, Chinon, Dampierre, Tricastin, Blayais	482 - 4 722	620 - 1 458	360 - 1 149	0,016 - 0,23	0,002 - 0,013
Civaux, Chooz	292 - 2 679	557 - 1 090	130 - 275	0,009 - 0,117	0,001 - 0,004
Belleville, Flamanville, Golfech, Nogent, Penly, St-Alban	150 - 1 753	543 - 1 223	98 - 771	0,01 - 0,108	0,001 - 0,014
Fessenheim, St-Laurent	31 - 344	286 - 688	22 - 342	0,007 - 0,026	0,0006 - 0,002

* PF/PA : produits de fission/produits d'activation : cobalt-60, cobalt-58, argent-110m, césium-137... (glossaire du chapitre 5).

TABLEAU 2 / GAMMES DES REJETS ANNUELS LIQUIDES (min. et max.) (GBq/an) POUR LA PÉRIODE 2020-2022
EN FONCTION DE LA PUISSANCE DES RÉACTEURS IMPLANTÉS SUR CHAQUE SITE

CNPE	Tritium (³ H)	Carbone-14 (¹⁴ C)	Iodes	PF/PA*
Gravelines	46 474 - 59 679	39,7 - 44,9	0,03 - 0,041	2,48 - 3,61
Cattenom, Paluel	69 912 - 102 182	28,9 - 48,0	0,009 - 0,02	0,49 - 1,31
Bugey, Cruas, Chinon, Dampierre, Tricastin, Blayais	30 438 - 44 303	7,6 - 63,8	0,01 - 0,03	0,35 - 1,69
Civaux, Chooz	5 248 - 60 124	1,5 - 39,2	0,002 - 0,03	0,11 - 0,89
Belleville, Flamanville, Golfech, Nogent, Penly, St-Alban	1 555 - 57 252	0,73 - 44,7	0,005 - 0,02	0,13 - 0,76
Fessenheim, St-Laurent	1 166 - 22 796	0,16 - 14,9	0,002 - 0,008	0,2 - 0,68

* PF/PA : produits de fission/produits d'activation : cobalt-60, cobalt-58, argent-110m, césium-137... (glossaire du chapitre 5).

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

Pour chacun des CNPE en exploitation, EDF effectue une surveillance des rejets à la source d'une part (avant, pendant et après les rejets dans le milieu récepteur), et une surveillance de la radioactivité de l'environnement à proximité des sites d'autre part. Dans ce qui suit, seules les dispositions de surveillance de la radioactivité de l'environnement sont présentées. EDF produit ainsi chaque année de l'ordre de 70 000 résultats de mesure de radioactivité de l'environnement autour de l'ensemble des CNPE en exploitation.

Les obligations réglementaires relatives à la surveillance de la radioactivité de l'environnement sont fixées de manière générale par la décision n° 2013-DC-0360 de l'ASN du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base, modifiée par la décision n° 2016-DC-0569 de l'ASN du 29 septembre 2016 (tableau 3-A), ainsi que par la décision n° 2017-DC-0588 de l'ASN du 6 avril 2017, relative aux modalités de prélèvement et de consommation d'eau, de rejets d'effluents et de surveillance de l'environnement des réacteurs électronucléaires à eau sous pression. Sur cette base, ces obligations sont précisées dans des décisions spécifiques propres à chaque CNPE.

TABLEAU 3-A / ANNEXE 2 À LA DÉCISION N° 2013-DC-0360 DE L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE DU 16 JUILLET 2013 RELATIVE À LA MAÎTRISE DES NUISANCES ET DE L'IMPACT SUR LA SANTÉ ET L'ENVIRONNEMENT DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES DE BASE. SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT PRÉVUE À L'ARTICLE 3.3.3 [MODIFIÉE PAR LA DÉCISION N° 2016-DC-0569 DE L'ASN DU 29 SEPTEMBRE 2016 – ART. 29]

Compartiment de l'environnement	Condition sur les rejets radioactifs	Nature du contrôle	Fréquence	Paramètres ou analyses (toute installation)	Paramètres ou analyses (installations susceptibles d'émettre des alphas)
Air au niveau du sol	Si rejets atmosphériques	Activité volumique dans l'air ⁽¹⁾	Hebdomadaire à mensuelle ⁽²⁾	En fonction des rejets de l'installation ⁽¹⁾	
		Poussières atmosphériques ^{(3) (4)}	Quotidienne	Détermination de l'indice d'activité bêta global et spectrométrie gamma ⁽⁹⁾ , si le bêta global est supérieur à 2 mBq/m ³	Détermination de l'indice d'activité alpha global et spectrométrie gamma ⁽⁹⁾ , si l'alpha global est supérieur à 2 mBq/m ³
			Mensuelle	Spectrométrie gamma ⁽⁹⁾ sur regroupement des filtres quotidiens d'une même station	Spectrométrie alpha ⁽¹⁰⁾ sur regroupement des filtres quotidiens d'une même station
Radioactivité ambiante		Radioactivité ambiante dans un rayon inférieur à 10 km autour de l'installation ⁽⁵⁾	Enregistrement continu	Débit de dose gamma ambiant	
Précipitations atmosphériques	Si rejets atmosphériques	Prélèvement continu des précipitations dans l'environnement	Bimensuelle	Détermination de l'indice d'activité bêta global, tritium ⁽⁷⁾ , potassium (sites marins) ⁽⁶⁾	Détermination de l'indice d'activité alpha global
Eaux de surface	Si rejets liquides	Contrôle des eaux de surface en aval des rejets	Horaire à mensuelle ⁽²⁾	Détermination de l'indice d'activité bêta global, tritium ⁽⁷⁾ , potassium ⁽⁶⁾	Détermination de l'indice d'activité alpha global
Eaux souterraines		Contrôle des eaux souterraines ⁽¹²⁾	Mensuelle à annuelle ⁽²⁾		Détermination de l'indice d'activité alpha global
Végétaux terrestres	Si rejets atmosphériques	Prélèvement de végétaux dans une zone située sous les vents dominants à proximité du site (environ 1 km)	Mensuelle à annuelle ⁽²⁾	Spectrométrie : gamma ⁽⁹⁾ , tritium ⁽⁷⁾ (HTO et TOL), carbone-14 ⁽⁷⁾	Spectrométrie alpha ⁽¹⁰⁾

Compartiment de l'environnement	Condition sur les rejets radioactifs	Nature du contrôle	Fréquence	Paramètres ou analyses (toute installation)	Paramètres ou analyses (installations susceptibles d'émettre des alphas)
Lait	Si rejets gazeux atmo-sphériques	Prélèvement de lait produit au voisinage de l'installation (0-10 km) ⁽⁸⁾	Mensuelle à annuelle ⁽²⁾	Spectrométrie : gamma ⁽⁹⁾ , tritium ⁽⁷⁾ , carbone-14 ⁽⁷⁾ , strontium-90 ⁽⁷⁾	
Sol	Si rejets atmo-sphériques	Prélèvement des couches superficielles des terres	Annuelle	Spectrométrie gamma ⁽⁹⁾	
Flore aquatique	Si rejets liquides	Prélèvements de flore aquatique dans les zones proches des rejets ^(2bis)	Annuelle	Spectrométrie gamma ⁽¹¹⁾	
Faune aquatique	Si rejets liquides	Prélèvements de faune aquatique dans les zones proches des rejets ^(2bis)	Annuelle	Eaux douces (y compris milieu dulçaquicole et estuaire) : spectrométrie gamma ⁽¹¹⁾ , tritium ⁽⁷⁾ (TOL) et carbone-14 ⁽⁷⁾ sur poissons Eaux marines : spectrométrie gamma ⁽¹¹⁾ et tritium ⁽⁷⁾ (TOL) sur crustacés, mollusques et poissons, et carbone-14 ⁽⁷⁾ sur poissons ou mollusques	
Sédiments	Si rejets liquides		Annuelle	Spectrométrie gamma ⁽¹¹⁾	Spectrométrie alpha ⁽¹⁰⁾
Productions agricoles	Si rejets atmo-sphériques	Prélèvement sur les principales productions agricoles, notamment dans les zones situées sous les vents dominants	Annuelle	Tritium ⁽⁷⁾ (HTO et TOL), spectrométrie gamma ⁽⁹⁾	

- (1) Via une station de prélèvement d'air, pour les catégories de radionucléides pour lesquelles une valeur limite d'émission est fixée.
- (2) Pour chaque installation, la périodicité est précisée dans la décision de l'Autorité de sûreté nucléaire fixant les prescriptions relatives aux modalités de rejets dans l'environnement des effluents.
- (2bis) En fonction des rejets qualitatifs et quantitatifs des rejets et des moyens techniques existants, pour lesquels une valeur limite d'émission est fixée.
- (3) Un point de mesure étant nécessairement situé sous les vents dominants par rapport à l'installation.
- (4) Via une station d'aspiration en continu sur un filtre fixe.
- (5) En limite d'installation ou d'établissement, la mesure en continu du débit de dose gamma ambiant peut être remplacée par une mesure du rayonnement gamma par dosimétrie passive à fréquence mensuelle.
- (6) Déterminé par mesure chimique.
- (7) Uniquement si rejeté par l'installation.
- (8) En cas de production laitière dans le périmètre de 10 kilomètres autour de l'installation.
- (9) Spectrométrie gamma portant notamment sur les radionucléides rejetés sous forme gazeuse et le potassium-40.
- (10) Spectrométrie alpha portant notamment sur les radionucléides rejetés sous forme gazeuse.
- (11) Spectrométrie gamma portant notamment sur les radionucléides rejetés sous forme liquide et le potassium-40.
- (12) Pour chaque installation, les piézomètres concernés par les mesures sur les eaux souterraines sont précisés dans la décision de l'Autorité de sûreté nucléaire fixant les prescriptions relatives aux modalités de rejets dans l'environnement des effluents.

L'IRSN réalise également, dans le cadre de ses missions, une surveillance autour des installations nucléaires et notamment des CNPE d'EDF (tableau 3-B). À ce titre plus de 30 000 résultats d'analyses de radioactivité sont produits annuellement. La majeure partie de ces résultats concerne l'air et l'eau qui sont les milieux récepteurs des rejets réalisés.

Afin de compléter cette surveillance, EDF a mis en place depuis plus de 30 ans une surveillance annuelle d'expertise dite « radioécologique » autour de ses CNPE, elle-même complétée par des bilans radioécologiques décennaux, dont la réalisation a été confiée à l'IRSN et à SUBATECH suite à un appel d'offres. L'utilisation de techniques métrologiques de pointe et le recours à des indicateurs biologiques dans le cadre de cette surveillance complémentaire de la surveillance de routine permettent d'affiner la connaissance de l'état radiologique des compartiments aquatiques et terrestres, qu'il s'agisse de la composante naturelle et/ou artificielle de la radioactivité présente.

Influence des CNPE sur leur environnement et expositions du public associées

En raison de leur importance relative en termes d'activités rejetées et de leur capacité de transfert dans l'environnement, le carbone-14 et le tritium sont les deux radionucléides pour lesquels l'influence des rejets d'effluents des CNPE est la plus facilement caractérisable dans l'environnement. Malgré leur faible radiotoxicité, ce sont les deux principaux contributeurs à l'exposition potentielle de la population résidant à proximité de ces installations.

Influence des rejets d'effluents dans l'atmosphère : cas du carbone-14

Le marquage de l'environnement autour des CNPE par leurs rejets atmosphériques de carbone-14 est faible et n'a pu être mesuré qu'au cours de deux campagnes effectuées par l'IRSN, l'une à Cruas de mai 2015 à mai 2016 (cf. focus du *Bilan radiologique 2015-2017*) et l'autre à Saint-Alban de janvier à octobre 2019.

À Cruas, les deux formes du carbone-14 dans l'air présentes dans les rejets du CNPE ont été mesurées : le dioxyde de carbone ($^{14}\text{CO}_2$) et le méthane ($^{14}\text{CH}_4$). Cette étude a montré que près des deux tiers des rejets du CNPE se trouvent sous forme de $^{14}\text{CH}_4$.

L'activité totale ajoutée par le CNPE au bruit de fond a été de $0,04 \text{ Bq/m}^3$ en moyenne sur l'année de la campagne, ce qui correspond à un doublement du bruit de fond de ce radionucléide dans l'air hérité des retombées des essais nucléaires (chapitre 1) qui se situe autour de $0,045 \text{ Bq/m}^3$.

TABLEAU 3-B / EXEMPLE DE PLAN TYPE DE LA SURVEILLANCE RÉALISÉE PAR L'IRSN AUTOUR DES CNPE D'EDF

Matrice	Fréquence	Analyse
Aérosols	Hebdomadaire	Spectrométrie gamma
Eau de pluie	Mensuel	Tritium total
Légumes feuilles	Annuel	Spectrométrie gamma, carbone-14 (^{14}C)
Céréales	Annuel	Spectrométrie gamma
Lait	Semestriel	Spectrométrie gamma, tritium libre (HTO)
Eau douce	Prélèvement horaire avec aliquote 6 jours	Tritium libre (HTO)
Matières en suspension dans l'eau	Mensuel	Spectrométrie gamma
Poissons	Annuel	Spectrométrie gamma, tritium organiquement lié (TOL), carbone-14 (^{14}C)

Pour une personne qui résiderait toute une année à l'emplacement où se trouvait la station de prélèvement (à 1 km sous les vents dominants du site), la dose liée à l'inhalation de cette activité ajoutée conduirait à une dose efficace pour un adulte de l'ordre de 0,001 µSv/an. Cette dose est cohérente avec celle estimée par EDF par calcul sur la base des rejets et elle est négligeable au regard des doses liées à l'ingestion de denrées produites dans une zone sous influence des rejets atmosphériques du CNPE et qui sont présentées dans le chapitre suivant.

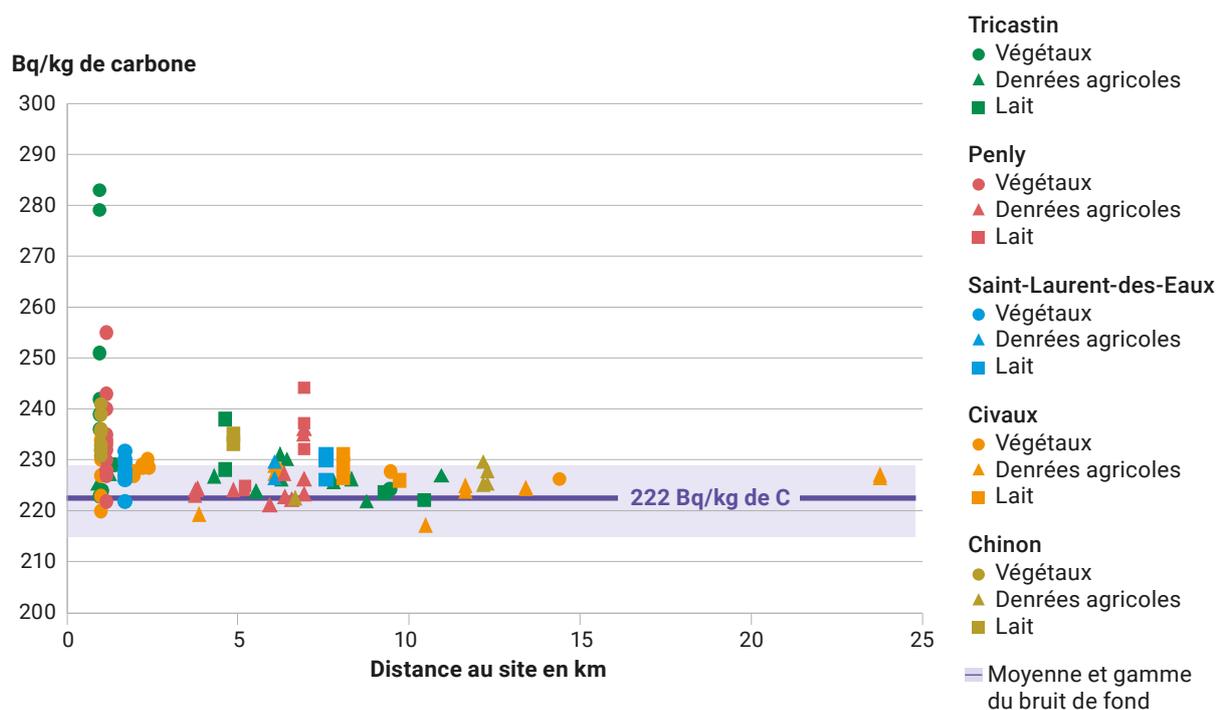
À Saint-Alban, en 2019, seule la forme $^{14}\text{CO}_2$ a pu être estimée avec une activité ajoutée de l'ordre de 0,003 Bq/m³, ce qui correspond à une activité de carbone-14 totale ajoutée ($^{14}\text{CO}_2 + ^{14}\text{CH}_4$) autour de 0,015 Bq/m³. Cette activité totale ajoutée est inférieure à celle mesurée à Cruas. Cela s'explique notamment par le fait que les rejets du CNPE de Cruas (4 x 900 MWe) sont plus importants que ceux du CNPE de Saint-Alban (2 x 1 300 MWe) (tableau 1).

Seul le carbone-14 présent dans l'air sous forme de $^{14}\text{CO}_2$, qui ne représente qu'un tiers des rejets gazeux de ce radionucléide, est susceptible d'être

absorbée par les végétaux lors de la photosynthèse. Le marquage des différentes composantes de l'environnement terrestre qui en résulte est trop faible pour être quantifié par la mesure de l'activité massique (en Bq/kg frais). Elle ne peut l'être que par des mesures de l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone (Bq/kg de carbone). Il s'agit d'un indicateur très sensible, utilisé notamment dans le domaine de l'expertise, qui est à même de discerner de faibles influences locales (chapitre 1). Cet indicateur est mesuré autour des CNPE dans le cadre de la surveillance de l'environnement effectuée par l'IRSN et également dans celui du suivi radioécologique des sites réalisé par l'IRSN et SUBATECH à la demande d'EDF et en complément des mesures de carbone-14 réglementairement prescrites⁽¹⁾.

La figure 2 présente l'évolution en fonction de la distance au site, des activités de carbone-14 entre 2020 et 2022 dans des échantillons de différentes composantes du compartiment terrestre autour des CNPE de Civaux, Tricastin, Chinon, Saint-Laurent-des-Eaux et Penly. Dans un rayon de 2 km autour de ces sites où l'influence est potentiellement la plus élevée, l'activité

FIGURE 2 / VARIABILITÉ ET ÉVOLUTION, EN FONCTION DE LA DISTANCE AUX SITES, DES ACTIVITÉS DE CARBONE-14 PAR UNITÉ DE MASSE DE CARBONE (Bq/kg de carbone) ENTRE 2020 ET 2022 DANS L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE DES CNPE DE CIVAUX, TRICASTIN, CHINON, SAINT-LAURENT-DES-EAUX ET PENLY



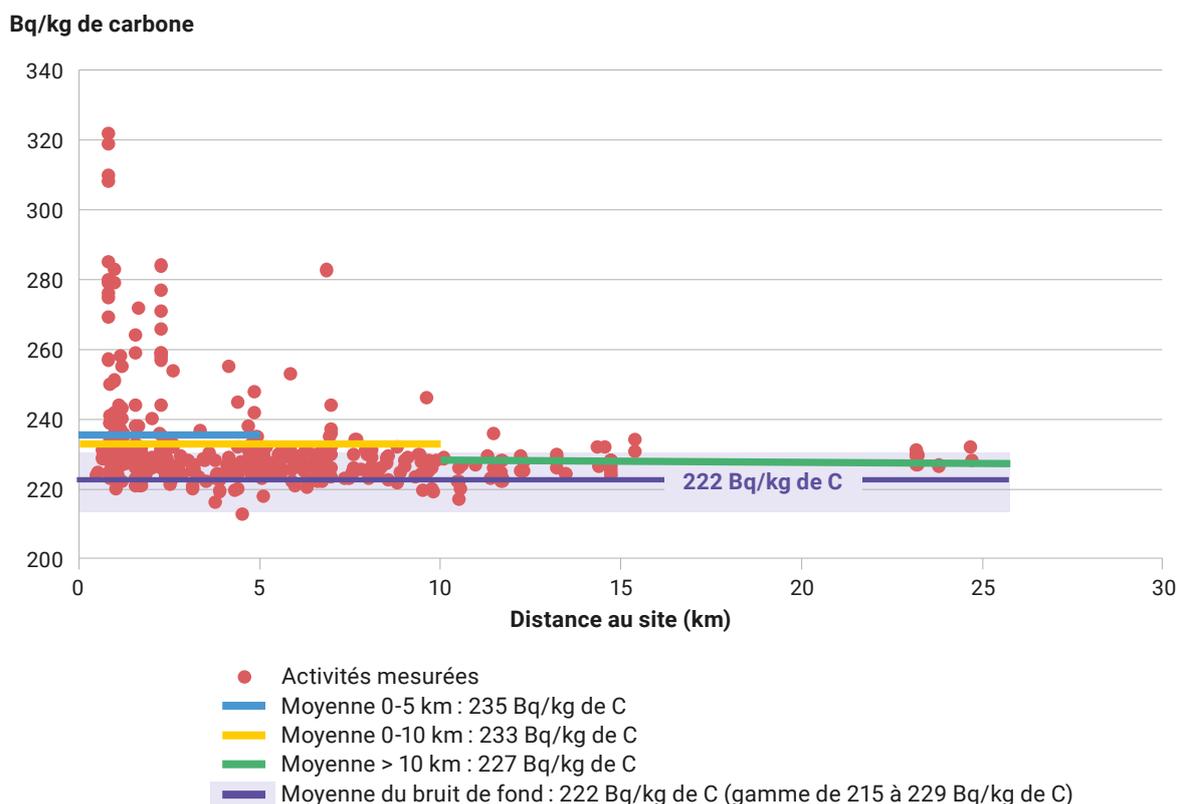
(1) Les résultats des mesures de carbone-14 prescrites dans la réglementation sont exprimés en Bq/kg frais. C'est cette expression que l'on retrouve sur le site du RNM. Les résultats exprimés en Bq/kg de C exploités dans ce document relèvent de l'expertise.

de carbone-14 est en moyenne de 7 % supérieure au bruit de fond radiologique (BdF = 222 Bq/kg de C sur la période 2021-2023, chapitre 1), ce qui était déjà le cas pour la période précédente (2018-2020). Pour l'échantillon dont l'activité mesurée a été la plus élevée (283 Bq/kg de C), cette activité est de 27 % supérieure au bruit de fond. Ces résultats sont très proches de ceux mentionnés dans les précédents *Bilans radiologiques (2015-2017 et 2018-2020)* pour les sites de Cruas, Saint-Alban, Paluel, Cattenom, Gravelines et Chooz. L'activité spécifique diminue ensuite avec la distance pour rejoindre le bruit de fond radiologique au-delà de 10 à 15 km. Les résultats présentés dans la figure 2 montrent également que, globalement, toutes les composantes de l'environnement terrestre (végétaux, denrées agricoles, lait) fournissent des indications similaires sur l'influence des rejets atmosphériques de carbone-14. Il faut signaler que la teneur en carbone-14 du lait est en grande partie le reflet de celle des fourrages consommés par les animaux et donc de la localisation des surfaces sur lesquelles ils sont produits. Le fait que les échantillons

de lait analysés soient marqués par les rejets des sites, témoigne qu'une large part des fourrages consommés par les vaches est d'origine locale.

La figure 3 permet d'étendre à l'ensemble des CNPE, cette caractérisation de l'influence des rejets atmosphériques de carbone-14 sur l'environnement terrestre, à partir des 403 résultats de mesure acquis entre 2020 et 2022. Comme pour les 5 sites présentés dans la figure 2, l'influence des rejets atmosphériques de carbone-14 de tous les CNPE diminue de manière similaire avec la distance ; cette diminution se traduit par une baisse de l'activité par unité de masse de carbone moyenne de ce radionucléide dans toutes les composantes de l'environnement et notamment dans les denrées produites localement. Dans un rayon de 5 km autour d'un CNPE, l'activité de carbone-14 moyenne ajoutée, établie sur la base des résultats de mesures acquis sur la période 2020-2022 autour de l'ensemble des 18 sites d'EDF, est de + 13 Bq/kg de C (soit BdF de 222 Bq/kg de C + 6 %). Cette valeur est légèrement supérieure à celle de + 12 Bq/kg de C

FIGURE 3 / VARIABILITÉ ET ÉVOLUTION, EN FONCTION DE LA DISTANCE AUX SITES, DES ACTIVITÉS DE CARBONE-14 PAR UNITÉ DE MASSE DE CARBONE (Bq/kg de carbone) ENTRE 2020 ET 2022 DANS DIFFÉRENTS TYPES DE VÉGÉTAUX, DE DENRÉES AGRICOLES OU ISSUES DE L'ÉLEVAGE, PRÉLEVÉS SOUS INFLUENCE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES DE L'ENSEMBLE DES CNPE



calculée pour la période précédente (2018-2020) qui était elle-même en légère augmentation par rapport à celle de + 11 Bq/kg de C calculée sur la période encore antérieure. Cette tendance à l'augmentation de l'activité de carbone-14 ajoutée au bruit de fond par les CNPE est très probablement liée à la baisse de ce bruit de fond qui est passé de 227 Bq/kg de C pour la période 2014-2016 à 225 Bq/kg de C pour la période 2017-2020 et à 222 Bq/kg de C pour la période 2020-2022 (tableau 4). Il faut par ailleurs noter que cette activité de carbone-14 moyenne ajoutée est pénalisante du fait du nombre plus important de données provenant de la proximité immédiate des sites (< 2 km). Dans un rayon de 10 km, l'activité ajoutée établie sur la base de 355 résultats de mesures, serait un peu plus faible : + 11 Bq/kg de C, soit BdF + 5 %.

Si les teneurs en carbone-14 les plus élevées sont mesurées dans des échantillons prélevés dans les 2 premiers kilomètres, comme pour les années antérieures, c'est également à ces faibles distances au site que l'on observe la plus grande variabilité des activités : de 220 à 322 Bq/kg de C. Cette variabilité est principalement liée à la localisation du lieu de prélèvement par rapport au site (azimut) en fonction de la rose des vents locale. Cette dépendance de l'influence des rejets atmosphériques d'un CNPE vis-à-vis de l'azimut a été illustrée dans le focus pp. 108-112 du *Bilan radiologique* précédent (2018-2020) : https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/expertise/rapports_expertise/IRSN-ENV_Bilan-Radiologique-France-2018-2020.pdf.

La principale voie d'exposition de la population associée aux rejets atmosphériques de ¹⁴C d'un CNPE est liée à la consommation potentielle de denrées produites localement. L'activité massique de carbone-14 ajoutée dans les denrées fraîches (Bq/kg frais) du fait des rejets du CNPE peut être déduite des activités de carbone-14 par unité de masse de carbone mesurées et présentées précédemment. Par exemple, à l'activité ajoutée de + 12 Bq/kg de carbone correspond une activité massique moyenne ajoutée de + 0,38 Bq/kg frais pour une salade, + 0,81 Bq/kg frais dans un fruit ou du lait de vache, + 2,6 Bq/kg frais dans de la viande de bœuf et jusqu'à + 5,2 Bq/kg frais dans des céréales.

Sur la base de la ration alimentaire et des pourcentages de denrées d'origines locales fournies au chapitre 5.4, les doses dues au carbone-14 résultant de l'ingestion de denrées produites dans un rayon de 5 km autour d'un CNPE sont estimées à 0,1 µSv/an et à 0,09 µSv/an si elles sont produites dans un rayon de 10 km autour d'un CNPE. Ces estimations sont très proches de celles présentées dans les précédents *Bilans radiologiques* (chapitre 2.6 La synthèse dosimétrique p. 262). Ces estimations sont par ailleurs du même ordre que celles estimées par EDF⁽²⁾ par calcul à partir des rejets atmosphériques de carbone-14. Ainsi, la dose efficace moyenne due aux rejets gazeux de carbone-14, tous CNPE confondus, estimée par EDF sur la base des rejets de 2022 est de 0,023 µSv/an dans une gamme allant de 0,002 µSv/an pour le CNPE de Civaux à 0,066 µSv/an pour le CNPE du Tricastin.

TABLEAU 4 / VALEURS REPRÉSENTATIVES DE L'INFLUENCE DES REJETS DE CARBONE-14 DES CNPE D'EDF SUR LEUR ENVIRONNEMENT TERRESTRE DEPUIS 2015 (Bq/kg de carbone)

Bq/kg de C	Moyenne des activités mesurées		BdF	Moyennes des activités ajoutées			
	0 à 5 km	0 à 10 km		0 à 5 km		0 à 10 km	
2015-2017	238	234	227	+ 11	+ 5 % du BdF	+ 7	+ 3 % du BdF
2018-2020	237	235	225	+ 12	+ 5 % du BdF	+ 10	+ 4 % du BdF
2021-2023	235	233	222	+ 13	+ 6 % du BdF	+ 11	+ 5 % du BdF

(2) La réglementation impose aux exploitants de réaliser annuellement une évaluation de l'impact radiologique à partir des rejets de l'installation (cf. art. 4.4.4 de l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales applicables aux INB – arrêté « INB » et les articles 5.3.1 et 5.3.2 de la décision de l'ASN n° 2013-DC-0360 du 16 juillet 2013 modifiée – décision « environnement »).

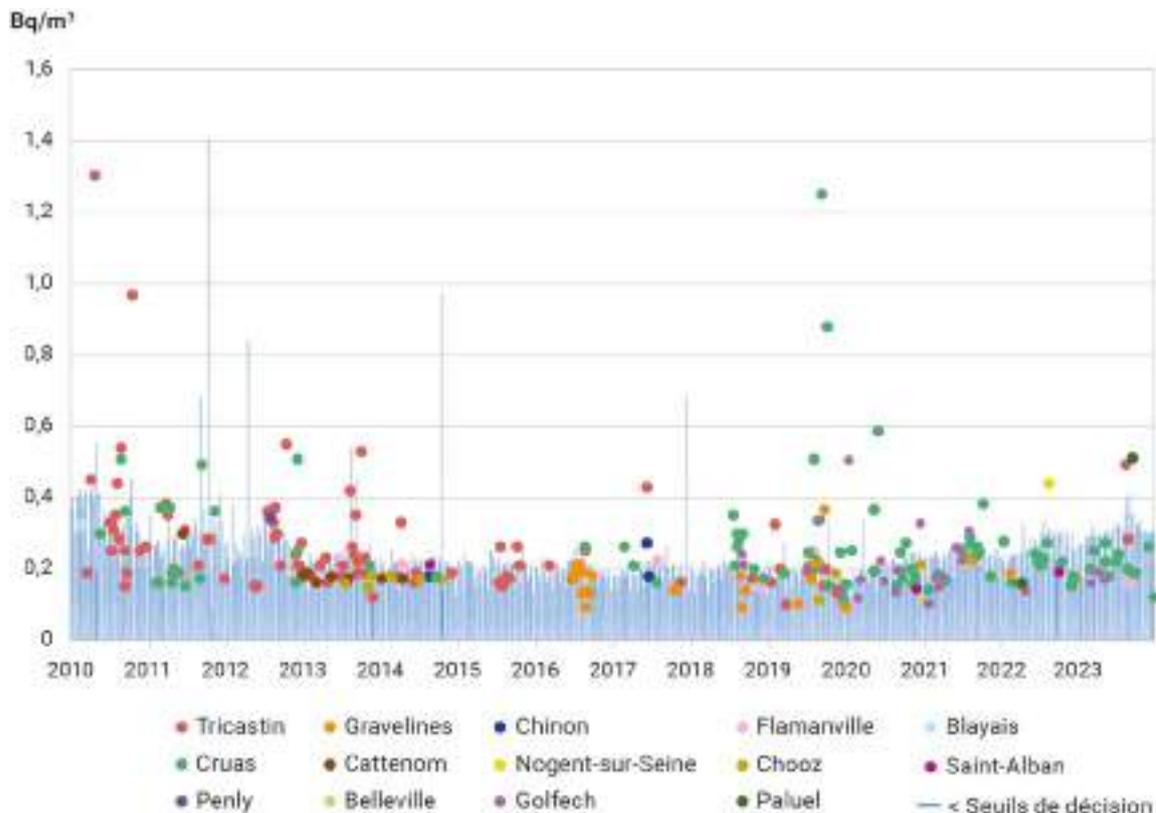
Influence des rejets d'effluents dans l'atmosphère : cas du tritium

Le tritium de la vapeur d'eau atmosphérique (HTO de l'air) est analysé hebdomadairement à proximité immédiate de chacun des CNPE dans le cadre de la surveillance réglementaire. La figure 4 qui présente les résultats de ces analyses depuis 2010 montre la constance de ces résultats au fil des années. 98 % des 2 800 échantillons prélevés sur la période 2021-2023, avaient une activité volumique inférieure à 0,2 Bq/m³ (figure 4). À noter qu'autour du site de Cruas, 30 % des analyses dépassent cette valeur de 0,2 Bq/m³. L'activité maximale de tritium dans l'air durant cette période a été de 0,51 Bq/m³ à Paluel en septembre 2023. Cette valeur reste cependant 100 fois inférieure à la limite réglementaire qui est de 50 Bq/m³ (décision n° 2017-DC-0588 de l'ASN du 6 avril 2017).

La quantification précise des activités de tritium dans l'air sous influence d'un CNPE a pu être faite au cours de la campagne de mesures effectuée par l'IRSN, justement autour du site de Cruas de mai 2015 à mai 2016 (cf. focus du *Bilan radiologique*

2015-2017). Les activités volumiques à moins de 1 km sous les vents du point de rejet, étaient le plus souvent comprises entre 0,03 et 0,1 Bq/m³, pour une moyenne de 0,07 Bq/m³. Une campagne similaire a été menée à proximité du CNPE de Saint-Alban, de février à novembre 2019, dans les mêmes conditions de prélèvements et de mesures (cf. le focus du *Bilan radiologique 2018-2020* pp. 108-112). L'activité volumique moyenne de tritium dans l'air (0,047 Bq/m³) a été plus faible du fait de rejets également plus faibles de ce CNPE dont la puissance de production (2 x 1 300 MWe) est moindre que celle du CNPE de Cruas (4 x 900 MWe). Bien que très faibles, ces moyennes, mesurées à proximité immédiate (de l'ordre de 1 km) de ces deux CNPE, sont respectivement 7 fois et 4 fois supérieures au bruit de fond radiologique du tritium dans l'air. Ces études montrent également que le tritium dans la vapeur d'eau (HTO), mesuré en routine par EDF, a représenté de l'ordre de 85 % du tritium émis, les autres formes (hydrogène tritié [HT] et méthane tritié [CH₃T]) étant largement minoritaires en termes d'activité volumique dans l'air et d'impact dosimétrique.

FIGURE 4 / ACTIVITÉS VOLUMIQUE DE TRITIUM (HTO) DANS L'AIR (Bq/m³) MESURÉES AUTOUR DES CNPE DEPUIS 2015



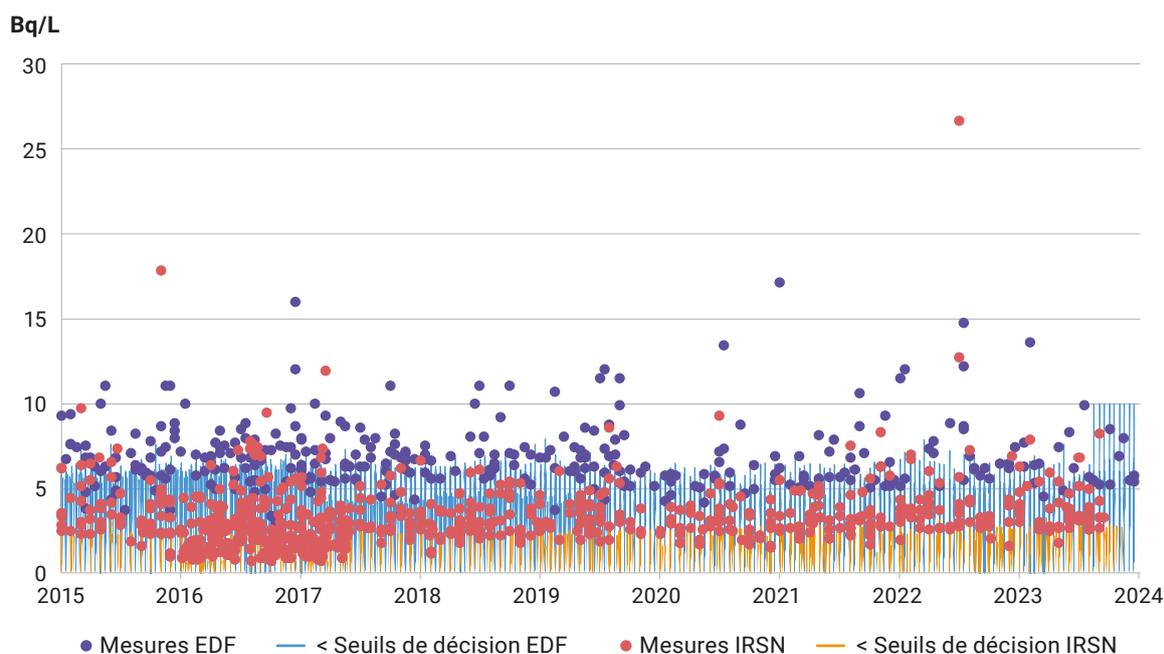
Même pour une personne qui résiderait toute l'année à l'emplacement où était installée la station de prélèvement de Cruas, la dose par inhalation et absorption transcutanée résultant de l'activité de tritium dans l'air ajoutée du fait des rejets serait de l'ordre de 0,007 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette estimation est cohérente avec celle calculée par EDF sur la base des rejets de 2016, 0,0024 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, quoique supérieure du fait que la station se trouve à moins de 1 km du point de rejet alors que l'estimation d'EDF porte sur la personne de référence (chapitre 5.5) qui se situe sur la commune de Savasse à 3,5 km du site.

La figure 5 présente les activités volumiques de tritium (HTO) mesurées dans les eaux de pluie prélevées à proximité des CNPE. Ces activités sont tout à fait cohérentes avec celles mesurées dans l'air. On rappelle qu'à une activité de 1 Bq/L dans la vapeur d'eau de l'air correspond une activité de l'ordre de 0,01 Bq/m³ d'air. Et ainsi, les activités moyennes de 4 Bq/L dans les eaux de pluie recueillies près des CNPE continentaux et marins sont comparables et cohérentes avec l'activité moyenne de 0,07 Bq/m³ (soit 7 Bq/L de tritium dans la vapeur d'eau de l'air) à Cruas.

Le tritium de la vapeur d'eau est incorporé par les végétaux lors de la photosynthèse. L'activité ajoutée dans l'air sous cette forme par les rejets des CNPE se traduit alors par une augmentation très locale de l'activité des végétaux et de la chaîne alimentaire qui en découle. Cette augmentation est également visible via la mesure de l'activité de tritium lié à la matière organique (TOL) de toutes les composantes biologiques de l'environnement. Cette activité de TOL est mesurée dans différents échantillons de végétaux, indicateurs (herbes, lierres), de denrées végétales, notamment des légumes feuilles, ainsi que dans des échantillons de lait prélevés autour des CNPE dans le cadre du suivi radioécologique des sites réalisés par l'IRSN et SUBATECH à la demande d'EDF.

Le marquage des différentes composantes de l'environnement terrestre qui en résulte est trop faible pour être quantifiée par la mesure de l'activité massique (en Bq/kg frais). Elle ne peut l'être que par des mesures de l'activité de tritium organiquement lié exprimée en becquerels par litre d'eau de combustion de la matière sèche (Bq/L_{ec})⁽³⁾. Il s'agit d'un indicateur très sensible à même de discerner de faibles influences locales (chapitre 1).

FIGURE 5 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM (HTO) DANS LES EAUX DE PLUIE (en Bq/L) RECUEILLIES À PROXIMITÉ DES CNPE CONTINENTAUX ET DE BORD DE MER



(3) Les résultats des mesures de tritium prescrites dans la réglementation sont exprimés en Bq/kg frais. C'est cette expression que l'on retrouve sur le site du RNM. Les résultats exprimés en Bq/L d'eau de combustion (Bq/L_{ec}) exploités dans ce document relèvent de l'expertise.

La figure 6 présente les activités de tritium organiquement lié, exprimées en Bq/L d'eau de combustion, dans divers échantillons prélevés à proximité des CNPE sur deux périodes : 2016-2019 (figure 6A) et 2020-2023 (figure 6B). Comme la figure 3 relative au carbone-14, cette figure montre que l'influence des rejets atmosphériques tritiés de ces installations diminue très rapidement avec la distance. Pour la période 2020-2023, la moyenne des 104 résultats d'analyses des échantillons provenant d'un rayon de 5 km autour des CNPE, d'une valeur de 2 Bq/L_{ec}, est 2,5 fois plus élevée que la valeur de référence du bruit de fond (0,8 Bq/L sur la période). Il faut toutefois noter que seulement 38 % des échantillons prélevés dans ce rayon ont une teneur en tritium qui sort de la gamme de variabilité de ce bruit de fond (de 0,3 à 1,8 Bq/L). Le tableau 5 permet de comparer les activités moyennes de tritium organiquement lié mesurées dans les 5 km, 10 km et au-delà de 10 km autour des CNPE au cours de la période 2020-2023 avec celles mesurées au cours des périodes précédentes et présentées dans les deux *Bilans radiologiques* précédents. Ce tableau montre aussi les évolutions du bruit de fond moyen et des activités ajoutées à ce bruit de fond par les rejets des CNPE.

Les activités moyennes calculées pour ces différents rayons autour des CNPE cachent une importante variabilité. Cette variabilité diminue également avec la distance. Ainsi à moins de 2 km des sites, les teneurs en tritium vont de moins de 0,6 Bq/L_{ec} à près de 6 Bq/L_{ec} (la valeur de 14 Bq/L_{ec} constituant une singularité). Cette variabilité est principalement liée à la localisation du lieu de prélèvement par rapport au site (azimut) en fonction de la rose des vents locale. Cette dépendance de l'influence des rejets atmosphériques d'un CNPE vis-à-vis de l'azimut a été étudiée dans le cadre de l'étude radiologique du CNPE de Saint-Alban – Saint-Maurice l'Exil (cf. focus du *Bilan radiologique 2018-2020* p. 110). Il faut toutefois noter que les activités de tritium mesurées dans quatre échantillons de maïs, prélevés à Loyettes à 2,5 km et 6 km du site du Bugey, se distinguent de celles habituellement mesurées dans les échantillons prélevés à cette distance.

Ces activités pourraient être liées à une utilisation, pour l'irrigation de culture, d'eau du Rhône qui présente des activités annuelles moyennes de tritium de l'ordre de 7 à 12 Bq/L, entre 2021 et 2023, en aval du Bugey.

De même que pour le carbone-14, la principale voie d'exposition de la population associée aux rejets atmosphériques de tritium est liée à la consommation potentielle de denrées produites localement. Sur la base de la ration alimentaire et des pourcentages de denrées d'origines locales fournies dans le tableau 7 au chapitre 5, la dose due au tritium résultant de l'ingestion de denrées produites dans un rayon de 5 km autour d'un CNPE, est estimée à 0,003 µSv/an ; cette dose extrêmement faible est constante dans le temps : elle était de 0,003 µSv/an pour la période 2015-2017 et de 0,002 µSv/an pour la période 2018-2020.

Influence des rejets d'effluents dans l'atmosphère des autres radionucléides

Les activités des autres radionucléides rejetés annuellement dans le respect des autorisations accordées sont de l'ordre de 10 000 à 100 000 fois inférieures à celles du tritium et du carbone-14. Il s'agit principalement des césium-134 et césium-137, des cobalt-58 et cobalt-60, de l'argent-110m et d'isotopes radioactifs de l'iode. Les activités de ces radionucléides dans l'air sont beaucoup trop faibles pour être mesurées dans le cadre de la surveillance de routine effectuée par EDF conformément aux exigences réglementaires. La figure 7 montre que le réseau OPERA-Air de l'IRSN permet de mesurer sporadiquement des activités de cobalt-60 et d'argent-110m autour des CNPE ; il s'agit des résultats présentés dans le graphique pour lequel le CNPE concerné est indiqué. Ces résultats se trouvent dans la gamme de variabilité des activités les plus faibles susceptibles d'être mesurées par le réseau OPERA-Air à moyen débit de l'IRSN (fond mauve). Cela explique le faible nombre de détections observées depuis 2015. Ces résultats sont à comparer à ceux obtenus lors des campagnes spécifiquement menées depuis 2011 par l'IRSN autour de certains CNPE en utilisant des

TABLEAU 5 / VALEURS REPRÉSENTATIVES DE L'INFLUENCE DES REJETS DE TRITIUM DES CNPE D'EDF SUR LEUR ENVIRONNEMENT TERRESTRE DEPUIS 2015 (Bq/L d'eau de combustion)

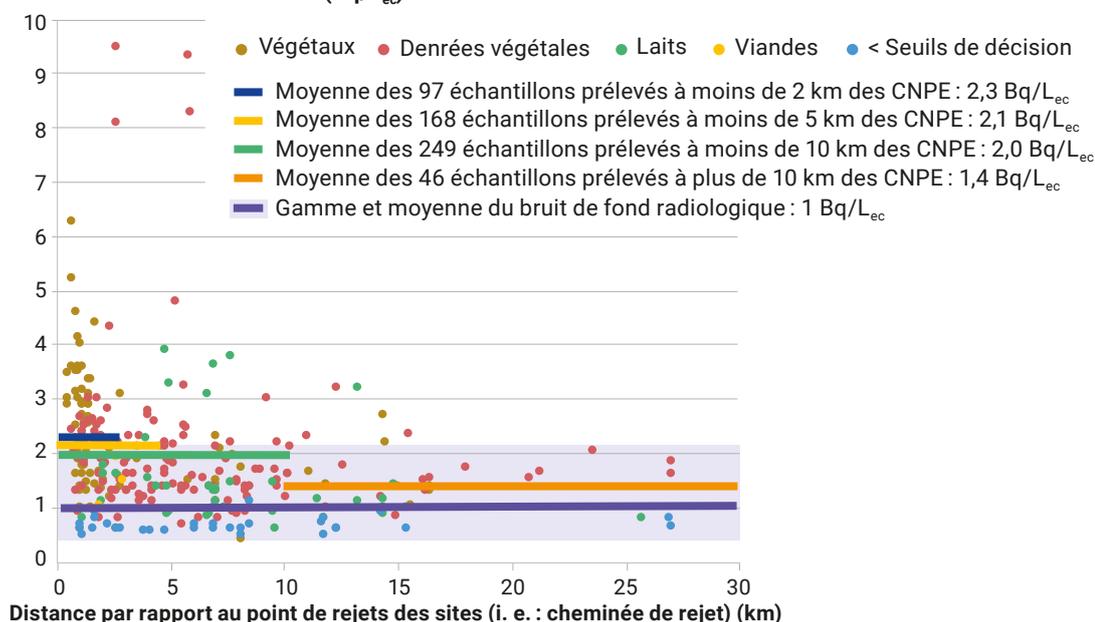
Bq/L d'eau de combustion	Moyenne des activités mesurées			BdF	Moyennes des activités ajoutées			
	0 à 5 km	0 à 10 km	> 10 km		0 à 5 km		0 à 10 km	
2015-2017	2,6	2	1,4	1,3	1,3	+ 100 % du BdF	0,7	+ 50 % du BdF
2018-2020	2,1	2	1,4	1	1,1	+ 110 % du BdF	1	+ 100 % du BdF
2021-2023	2	1,8	1,7	0,8	1,2	+ 150 % du BdF	1	+ 125 % du BdF

stations de prélèvement plus performantes à grand débit (300 m³/h) pour caractériser plus précisément les activités dans l'air résultant du fonctionnement normal de ces installations (cf. focus du *Bilan radiologique 2015-2017* pp. 87-89 et commentaires p. 114 du *Bilan radiologique 2018-2020*). Si l'on excepte

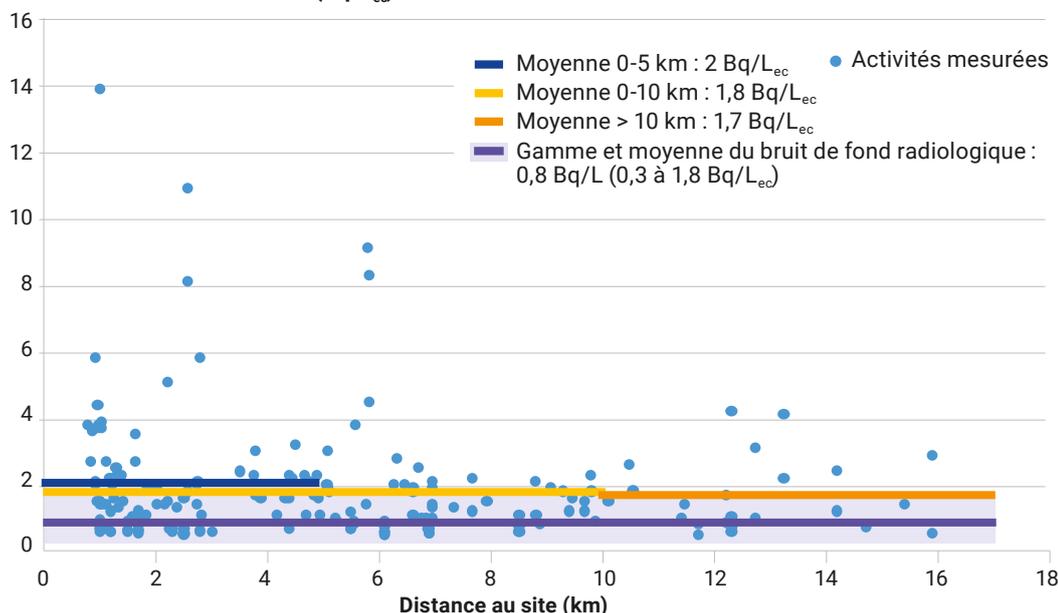
les activités nettement plus élevées de 50,7 µBq/m³ mesurées en avril 2018 à Gravelines et 20,8 µBq/m³ mesurées en janvier 2023 à Civaux, les autres activités mesurées par le réseau OPERA-Air sont dans la gamme de celles mesurées lors de ces campagnes.

FIGURES 6A ET 6B / ÉVOLUTION ET VARIABILITÉ DES ACTIVITÉS DE TRITIUM LIÉ À LA MATIÈRE ORGANIQUE (Bq/L d'eau de combustion) DANS DIVERSES COMPOSANTES DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE, EN FONCTION DE LA DISTANCE AUX ÉMISSAIRES DE REJETS ATMOSPHÉRIQUES DES CNPE

2016-2019 : 295 résultats de mesure (Bq/L_{ec})



2020-2023 : 242 résultats de mesure (Bq/L_{ec})

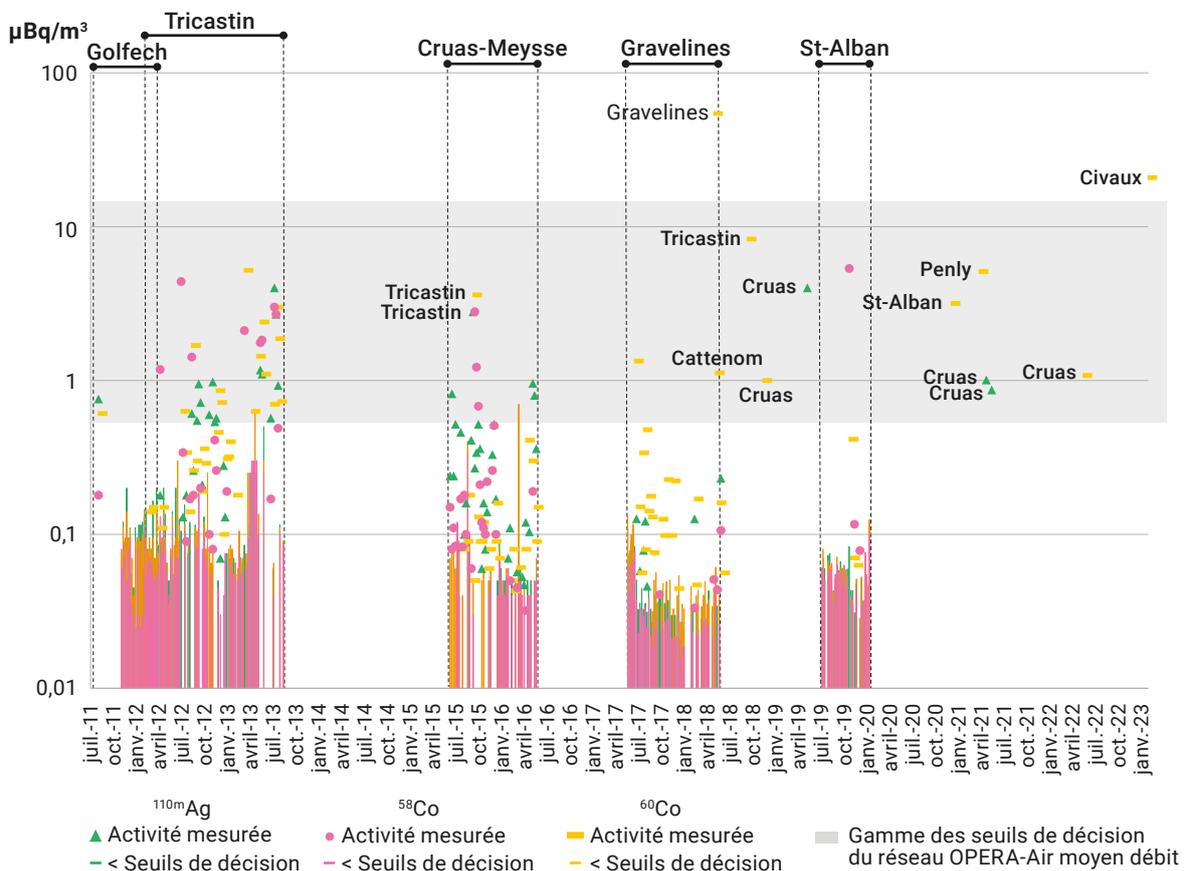


Les radionucléides mesurés lors de ces campagnes sont à l'origine d'une exposition de la population par inhalation mais également par exposition externe en lien avec le rayonnement émis par certains radionucléides dans l'air. Une personne qui résiderait aux endroits où étaient installées les stations de prélèvement recevrait une dose très inférieure à 0,001 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, presque exclusivement due à l'incorporation par inhalation, la contribution de l'exposition externe n'étant que de quelques pourcents. Cette dose négligeable est cohérente avec celle calculée par EDF sur la base des rejets.

Une fois émis dans l'air, les aérosols radioactifs retombent au niveau du sol où ils peuvent être captés par les végétaux. Mais les activités dans les végétaux sont trop faibles pour être mesurées même au moyen des techniques les plus performantes. Cependant, à partir des mesures d'activités de l'air, il est possible d'évaluer celles des denrées produites localement.

Ainsi, pour les denrées les plus sensibles aux retombées atmosphériques, comme les légumes feuilles (salades, épinards...), les activités massiques seraient inférieures à 1 mBq/kg frais pour chacun des radionucléides susmentionnés ; ces niveaux sont bien en deçà des seuils de décisions des techniques métrologiques les plus performantes (de l'ordre de 3 à 10 mBq/kg frais pour les ^{60}Co , ^{58}Co et $^{110\text{m}}\text{Ag}$). Dans le cas du césium-137, il est à noter que l'activité ajoutée ne peut être distinguée de la rémanence des retombées anciennes (chapitre 1) illustrant *de facto* la faible contribution du CNPE aux niveaux ambiants mesurés pour ce radionucléide. Les doses résultant de l'ingestion de ces radionucléides seraient tout à fait négligeables (au maximum de l'ordre de 0,001 $\mu\text{Sv}/\text{an}$) au regard de celles liées à l'incorporation de carbone-14 par ingestion de denrées terrestres (0,1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$) ou de l'incorporation potentielle de tritium *via* la consommation d'eau de boisson (de 0,07 à 0,7 $\mu\text{Sv}/\text{an}$).

FIGURE 7 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES (hors césium-137) MESURÉS SUR LES FILTRES D'AÉROSOLS COLLECTÉS EN ROUTINE (nom du CNPE indiqué près des symboles) ET LORS DES CAMPAGNES RÉALISÉES PAR L'IRSN DEPUIS 2011 À PROXIMITÉ DES SITES DE GOLFECH, TRICASTIN, CRUAS-MEYSSE, GRAVELINES ET SAINT-ALBAN - SAINT-MAURICE



Influence du carbone-14 présent dans les rejets d'effluent liquides

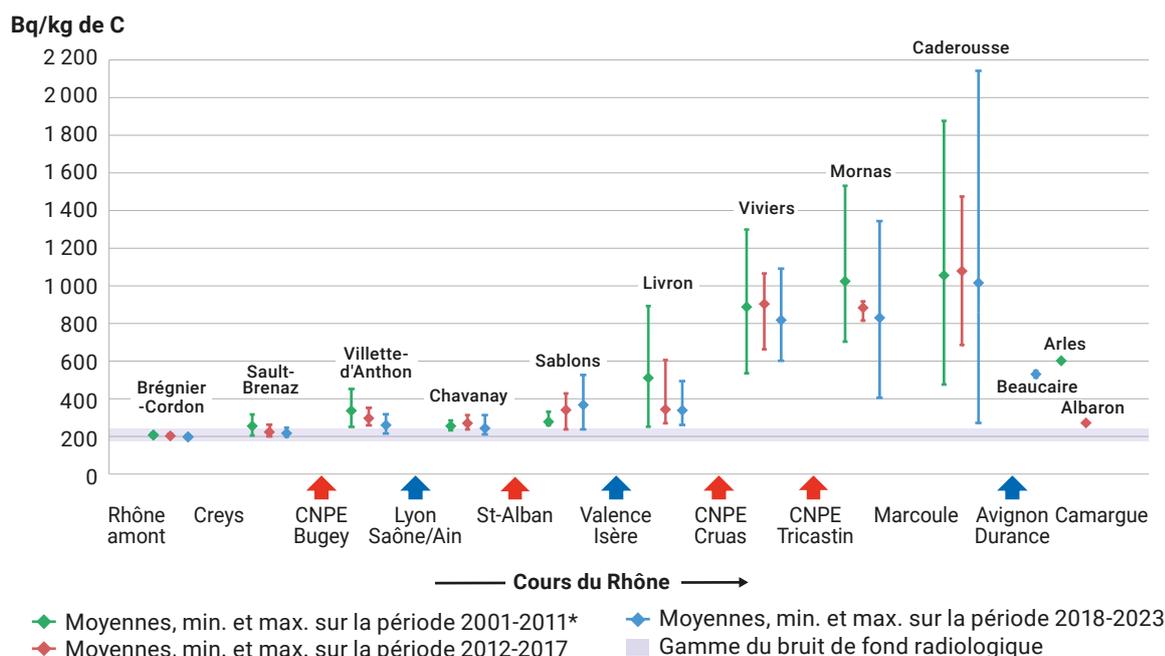
L'activité de carbone-14 des poissons en amont et en aval de chaque CNPE fait l'objet d'analyses annuelles, d'une part dans le cadre du programme de surveillance réglementaire d'EDF et d'autre part, dans celui de l'IRSN.

Les résultats acquis montrent que l'activité de carbone-14 des poissons des cours d'eau français, soumis aux rejets de carbone-14 par voie liquide par les CNPE, conduit à une augmentation très variable, mais néanmoins visible, contrairement aux denrées terrestres, de l'activité massique de carbone-14 (Bq/kg frais) des poissons pêchés dans les cours d'eau concernés. Cependant, pour une analyse plus précise, il convient d'utiliser les résultats des mesures de l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone (Bq/kg de carbone)⁽⁴⁾. Le long du Rhône, cette activité fluctue en fonction des apports liés aux rejets des installations nucléaires présentes sur ce fleuve d'une part, et d'autre part sous l'effet de la dilution par le débit du fleuve notamment lorsqu'il reçoit l'eau de ses affluents. La figure 8 présente cette évolution au fil

du Rhône et souligne la relative stabilité dans le temps des activités en comparant les périodes 2001-2011, 2012-2017 et 2018-2023.

En amont du site de Creys-Malville, au niveau de Brégnier-Cordon, les activités entre 2021 et 2022, de 198 à 202 Bq/kg de C (18 à 21 Bq/kg frais), témoignent du bruit de fond radiologique du carbone-14 dans les poissons d'eau douce français pour cette période (chapitre 1). Les poissons pêchés entre 2021 et 2022 en aval du CNPE du Bugey présentent une activité moyenne de 248 Bq/kg de C (24 Bq/kg frais), soit une augmentation de + 45 Bq/kg par kg de C par rapport au bruit de fond radiologique moyen (BdF). Pour une consommation annuelle de 1,3 kg de poissons par an qui correspond à celle d'un pêcheur amateur occasionnel, la dose correspondante à cette activité ajoutée serait de 0,004 µSv/an. Dans l'hypothèse plus pénalisante de personnes consommant plus régulièrement des poissons (5,3 kg/an) elle atteindrait 0,015 µSv/an. En amont de Saint-Alban, l'activité moyenne de carbone-14 des poissons diminue sensiblement sous l'effet de la dilution, notamment par les apports d'eau de l'Ain et de la Saône (238 Bq/kg de C). Les rejets des CNPE de

FIGURE 8 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ DE CARBONE-14 DES POISSONS (Bq/kg de carbone), TOUT AU LONG DU COURS DU RHÔNE, ÉTABLIE SUR LA BASE DES MESURES RÉALISÉES SUR LA PÉRIODE 2001-2011 (en vert), 2012-2017 (en rouge), 2018-2023 (en bleu)



* Avant 2009, les données ne portent que sur certaines années (bilans décennaux et études spécifiques).

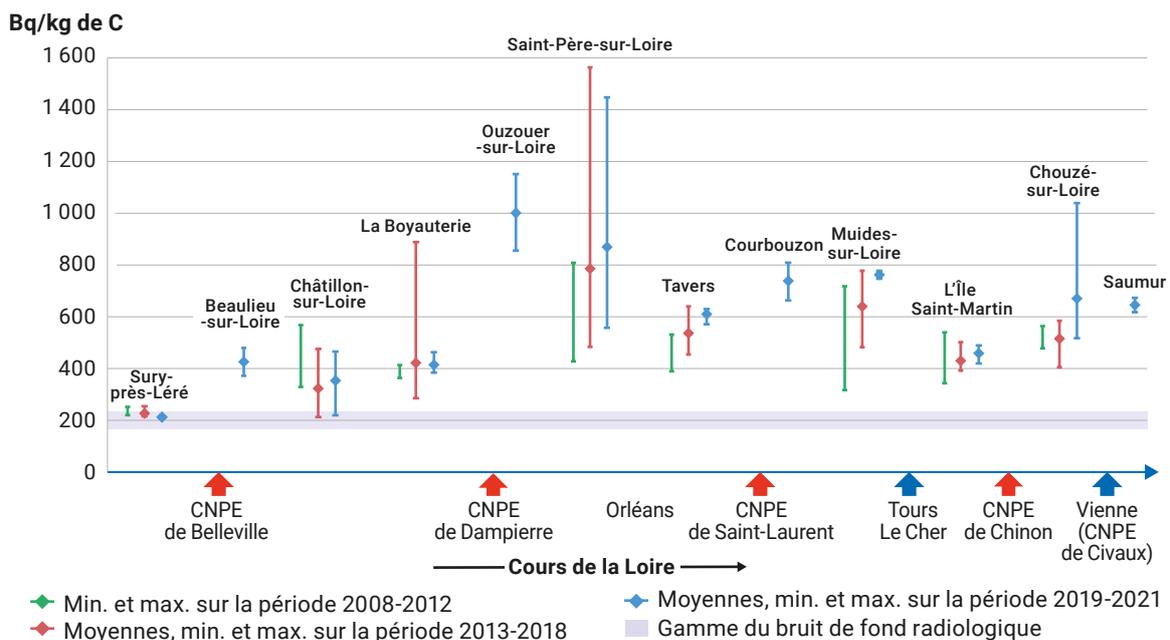
(4) Les résultats des mesures de carbone-14 prescrites dans la réglementation sont exprimés en Bq/kg frais. C'est cette expression que l'on retrouve sur le site du RNM. Les résultats exprimés en Bq/kg de C exploités dans ce document relèvent de l'expertise.

Saint-Alban, Cruas et Tricastin conduisent ensuite à une augmentation progressive de l'activité moyenne de carbone-14 dans les poissons, pêchés en aval de ces sites sur la période 2021-2022, allant de 333 Bq/kg de C (34 Bq/kg frais), soit BdF + 129 Bq/kg de C, à 874 Bq/kg de C (91 Bq/kg frais) soit BdF + 671 Bq/kg de C. À ces augmentations correspondent des doses ajoutées de l'ordre de 0,01 à 0,05 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un consommateur occasionnel⁽⁵⁾ (1,3 kg/an) et de 0,06 à 0,2 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un consommateur régulier (5,3 kg/an). Les activités moyennes de carbone-14 dans les poissons prélevés le long du linéaire rhodanien sur la période 2021-2022 sont du même ordre de grandeur que celles calculées lors du précédent *Bilan radiologique* couvrant la période 2018-2020. Les activités maximales sont mesurées dans les poissons pêchés en aval du centre de Marcoule au niveau de Chusclan, avec une activité moyenne de 98 Bq/kg frais sur la période 2021-2023. Compte tenu des activités de carbone-14 des effluents liquides du site de Marcoule (chapitre 2.4 Le site de Marcoule), ces activités résultent principalement des rejets des CNPE situés en amont. Avec la distance par rapport aux rejets des installations nucléaires rhodaniennes et l'apport des eaux de la Durance en particulier, l'activité

de carbone-14 dans les poissons se rapproche ensuite du bruit de fond radiologique, notamment au niveau de la Camargue.

Une évolution similaire est observée au travers des analyses de carbone-14 réalisées sur des poissons de la Loire pêchés au cours de trois périodes 2008-2012, 2013-2018 et 2019-2021 (figure 9). À Sury-près-Léré, en amont du CNPE de Belleville, avec une activité moyenne de 212 Bq/kg de C (26 Bq/kg frais) sur la période 2019-2021, l'activité de carbone-14 des poissons se situe dans la gamme du bruit de fond radiologique sur cette même période. Les rejets liquides des CNPE de Belleville, Dampierre et Saint-Laurent entraînent une augmentation de cette activité, allant de 375 Bq/kg de C (44 Bq/kg frais) à l'aval de Belleville à 924 Bq/kg de C (110,5 Bq/kg frais) à l'aval de Dampierre à Saint-Père-sur-Loire et 751 Bq/kg de C (106 Bq/kg frais) à l'aval de Saint-Laurent à Muides-sur-Loire. À cette activité maximale ajoutée de + 712 Bq/kg de C (85 Bq/kg frais) par rapport au bruit de fond, correspondrait une dose liée à la consommation de poissons de 0,06 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un consommateur occasionnel (1,3 kg/an) et 0,25 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ dans l'hypothèse plus pénalisante de consommateur régulier (5,3 kg/an). La dilution, par les eaux du Cher

FIGURE 9 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ DE CARBONE-14 DES POISSONS (Bq/kg de carbone), TOUT AU LONG DU COURS DE LA LOIRE, ÉTABLIE SUR LA BASE DES MESURES RÉALISÉES SUR LES PÉRIODES 2008-2012 (en vert), 2013-2018 (en rouge) ET 2019-2021 (en bleu)



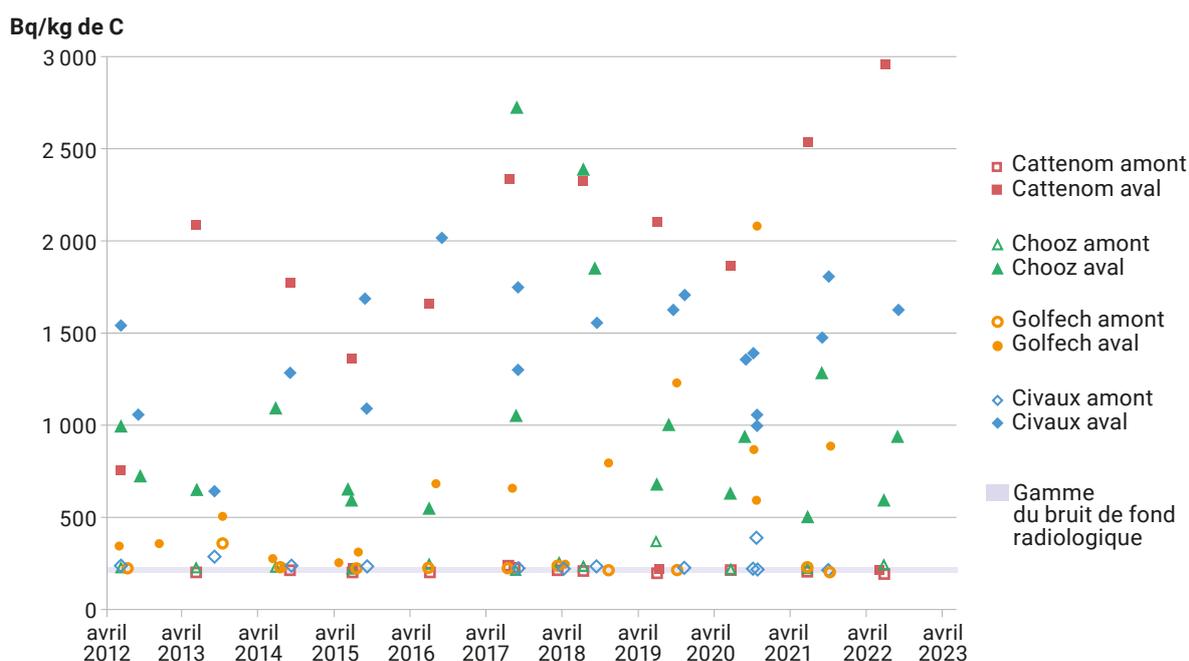
(5) À noter qu'en raison de pollutions chimiques sans lien avec les CNPE, la pêche, et donc la consommation de poissons, est partiellement interdite dans différents tronçons du Rhône.

(notamment), fait baisser l'activité de carbone-14 des poissons à 458 Bq/kg de C (60 Bq/kg frais) au niveau de l'île Saint-Martin, avant que les rejets liquides de Chinon ne la fassent augmenter de nouveau à 668 Bq/kg de C (84 Bq/kg frais) soit BdF + 456 Bq/kg de C à la hauteur de Chouzé-sur-Loire. En dehors de l'activité moyenne dans les poissons pêchés en amont du CNPE de Belleville, les activités moyennes sur la période 2019-2021 sont très majoritairement plus élevées à l'amont comme à l'aval des CNPE par rapport à celles relatives à la période précédente (2013-2018). La figure 9 présente également les activités de carbone-14 dans des poissons pêchés à l'aval proche des points de rejets liquides des CNPE de la Loire lors d'une campagne réalisée spécifiquement par l'IRSN en 2021 (à Beaulieu-sur-Loire, Ouzouer-sur-Loire, Courbouzon et Chouzé-sur-loire). Ces activités sont, comme attendu, plus élevées que celles mesurées dans les poissons pêchés dans le cadre de la surveillance réglementaire, car elles sont représentatives d'une portion du fleuve plus proche du site où les rejets sont moins dilués.

La figure 10 permet de comparer les activités de carbone-14 dans les poissons à l'amont et à l'aval de quelques autres CNPE depuis 2012. Elle montre

notamment l'influence du débit des cours d'eau récepteurs – et donc leur capacité à diluer/disperser les rejets d'effluents liquides des CNPE – sur les activités des poissons pêchés en aval des points de rejets. À l'exception de quelques prélèvements en amont des CNPE de Civaux (2013 et 2020), Golfech (2013) et Chooz (2019), toutes les activités des échantillons de poissons prélevés en amont sont dans la gamme du bruit de fond radiologique. Ces exceptions témoignent de possibles déplacements des poissons entre l'amont et l'aval des points de rejet. Les activités à l'aval des sites sont extrêmement variables et en relation directe avec le débit des cours d'eau. En aval de Golfech, les activités dans les poissons pêchés à Saint-Sixte ou Lamagistère, sont en moyenne de 1 135 Bq/kg de C (140 Bq/kg frais), soit une activité ajoutée par rapport à l'amont de + 922 Bq/kg de C (111 Bq/kg frais). Ces résultats sont parmi les plus élevés mesurés en aval du CNPE de Golfech, avec par exemple une activité maximale de 2 083 Bq/kg de C (139 Bq/kg frais) à Lamagistère en 2020. Comme pour la précédente période d'observation les activités de carbone-14 des poissons pêchés dans la Moselle et dans la Vienne en aval des sites de Cattenom et Civaux sont très majoritairement supérieures à celles mesurées à

FIGURE 10 / ACTIVITÉS DE CARBONE-14 (Bq/kg de carbone) MESURÉES DEPUIS 2012 DANS LES POISSONS PÊCHÉS EN AMONT ET EN AVAL DES REJETS DES CNPE DE CATTENOM, CHOOZ, GOLFECH ET CIVAUX



l'aval des autres CNPE. En aval de Cattenom et de Civaux, les activités moyennes des poissons pêchés entre 2020 et 2022 sont de 1 487 et 1 429 Bq/kg de C (182 et 172 Bq/kg frais) respectivement soit + 1 278 et + 1 220 Bq/kg de C par rapport au bruit de fond (BdF + 157 et + 147 Bq/kg frais). En comparaison dans le Rhône, en aval de Tricastin, où les différents rejets des CNPE rhodaniens s'ajoutent, l'activité dans les poissons est de 859 Bq/kg de C (96 Bq/kg frais) en moyenne.

Toutefois, malgré ces niveaux d'activités plus élevés que ceux mentionnés précédemment, les doses liées à la consommation de ces poissons restent extrêmement faibles. Par exemple, en aval du CNPE de Cattenom les doses dues à l'activité ajoutée seraient de 0,1 µSv/an pour un consommateur occasionnel et 0,5 µSv/an pour une personne qui consommerait 5,3 kg de poissons par an (valeur maximale proposée par Santé publique France pour une personne pratiquant régulièrement la pêche de loisir en rivière). À titre indicatif, la dose liée à la consommation de poissons pêchés en aval de Cattenom, calculée par EDF sur la base des rejets de 2022 est de 0,3 µSv/an.

De manière plus générale, dans les précédents bilans, les doses moyennes ajoutées liées à la consommation de poissons marqués par les rejets d'effluents liquides des CNPE contenant du carbone-14, tous sites confondus et pour un consommateur régulier (5,3 kg/an), étaient estimées entre 0,12 µSv/an pour 2011-2014 et 0,2 µSv/an pour 2018-2020. Pour la période 2021-2023 cette dose est estimée à 0,23 µSv/an.

Influence des rejets d'effluents liquides tritiés

L'essentiel du tritium présent dans le milieu fluvial en aval des CNPE provient des rejets autorisés d'effluents liquides des installations. La rémanence des essais atmosphériques d'armes nucléaires et la production naturelle de tritium cosmogénique (chapitre 1) conduisent à un « bruit de fond radiologique » de l'ordre de 0,3 à 1,8 Bq/L sur la période 2021-2023. Les activités mesurées à partir des échantillons prélevés de manière permanente⁽⁶⁾ par des hydrocollecteurs de l'IRSN sont liées aux rejets de chaque site, au débit du cours d'eau et donc à sa capacité à disperser les rejets, ainsi que, pour les sites situés en aval d'autres sites, à un effet de cumul (figures 11, 12, 13 et 14 pour les évolutions au fil des années et figure 15 pour les moyennes des trois dernières années).

Les activités volumiques moyennes de tritium en aval des installations dans les eaux des cours d'eau récepteurs des rejets liquides pour la période 2021-2023 sont très proches de celles mesurées lors du précédent *Bilan radiologique 2018-2020*. Seules les activités moyennes de tritium en aval des CNPE de Civaux et Chooz sur ces périodes ont significativement diminué en passant de 24,2 à 13,1 Bq/L et de 17,9 à 12,8 Bq/L respectivement, en liaison avec des arrêts prolongés de réacteurs pour des opérations de maintenance. Ainsi, les activités moyennes annuelles les plus faibles sont calculées dans le Rhône malgré le nombre d'installations qui y rejettent ce radionucléide : 5,5 et 5,8 Bq/L en aval de Tricastin et Saint-Alban respectivement et jusqu'à 12 Bq/L en aval de Bugey. Les activités moyennes annuelles dans la Loire sont comprises entre 11 Bq/L en aval de Chinon et 37,5 Bq/L en aval de Dampierre. C'est dans les cours d'eau de moindre débit qu'ont été calculées les activités moyennes annuelles les plus élevées : avec 37,5 Bq/L sur la Moselle en aval de Cattenom et 50 Bq/L sur la Seine en aval de Nogent. Ces activités dans les cours d'eau se situent en dessous des limites réglementaires (activité volumique moyenne journalière de 140 Bq/L en présence d'un rejet et 100 Bq/L sinon ; décision n° 2017-DC-0588 de l'ASN du 6 avril 2017) et sont de l'ordre de 300 à 3 000 fois inférieures à la valeur guide recommandée par l'OMS pour le tritium dans les eaux de boisson (10 000 Bq/L).

(6) Le caractère permanent est conféré par un prélèvement séquentiel ; l'activité mesurée est donc bien représentative de l'activité moyenne mensuelle (chapitre 1 p. 15).

FIGURE 11 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES MOYENNES ANNUELLES DE TRITIUM DES EAUX DE LA LOIRE EN AVAL DES CNPE DE BELLEVILLE, DAMPIERRE, CHINON, SAINT-LAURENT ET CIVAUX (Bq/L)

Les chroniques d'activités volumiques moyennes annuelles de tritium mesurées par l'IRSN depuis les années 1980 dans les eaux de la Loire mettent en évidence la stabilité des rejets liquides de tritium des CNPE d'EDF depuis les années 2000. On note également des activités plus importantes en aval de Chinon jusqu'en 2000. Après 2000, les activités moyennes annuelles fluctuent moins d'une année sur l'autre. Cela peut résulter en partie d'une concertation préalable aux rejets prescrite aux quatre CNPE implantés sur la Loire pour les situations d'étiage : le CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux coordonne dans ce cas, 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 de tritium dans le fleuve qui n'avait pas été observée depuis 1996. Des pics de moyennes d'activités annuelles plus élevées que de coutume sont également observés en 2015 et 2019.

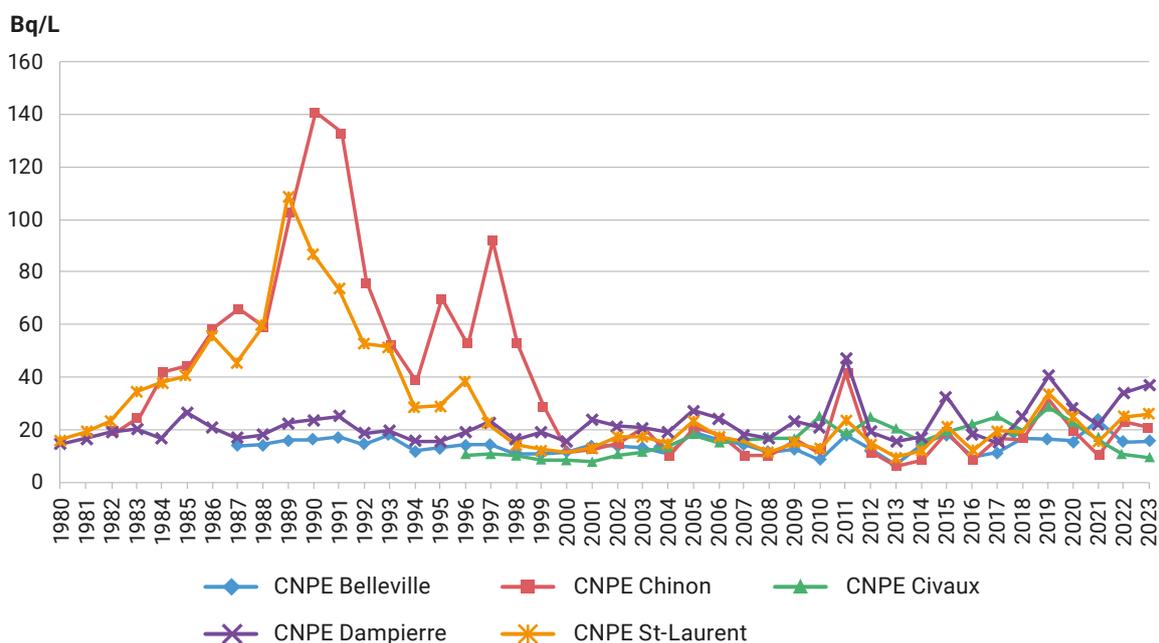


FIGURE 12 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES MOYENNES ANNUELLES DE TRITIUM DES EAUX DE LA MEUSE, DE LA MOSELLE, ET DE LA SEINE EN AVAL DES CNPE DE CHOOZ, CATTENOM ET NOGENT (Bq/L)

L'arrêt définitif de l'exploitation du CNPE de Chooz-A en 1991 a entraîné une forte baisse de l'activité de tritium dans la Meuse au début des années 1990, passant de 40 Bq/L à 10 Bq/L en moyenne annuelle. Depuis le milieu des années 1990, l'activité moyenne annuelle du tritium dans la Meuse fluctue entre 10 et 30 Bq/L. En 2022, l'activité dans la Meuse est nettement inférieure aux années précédentes suite à l'arrêt des installations de Chooz en lien avec le phénomène de corrosion sous contrainte. Cette diminution reflète la baisse des rejets liquides de tritium en lien avec les arrêts des unités de production entre décembre 2021 et avril-mai 2023. L'activité moyenne annuelle dans la Moselle en aval du CNPE de Cattenom qui était également en constante augmentation, depuis 1985, passant de 15 Bq/L à 40 Bq/L en 2019 est redescendue progressivement entre 20 et 30 Bq/L. L'activité moyenne annuelle mesurée dans la Seine en aval du CNPE de Nogent est très fluctuante oscillant entre 15 et près de 60 Bq/L.

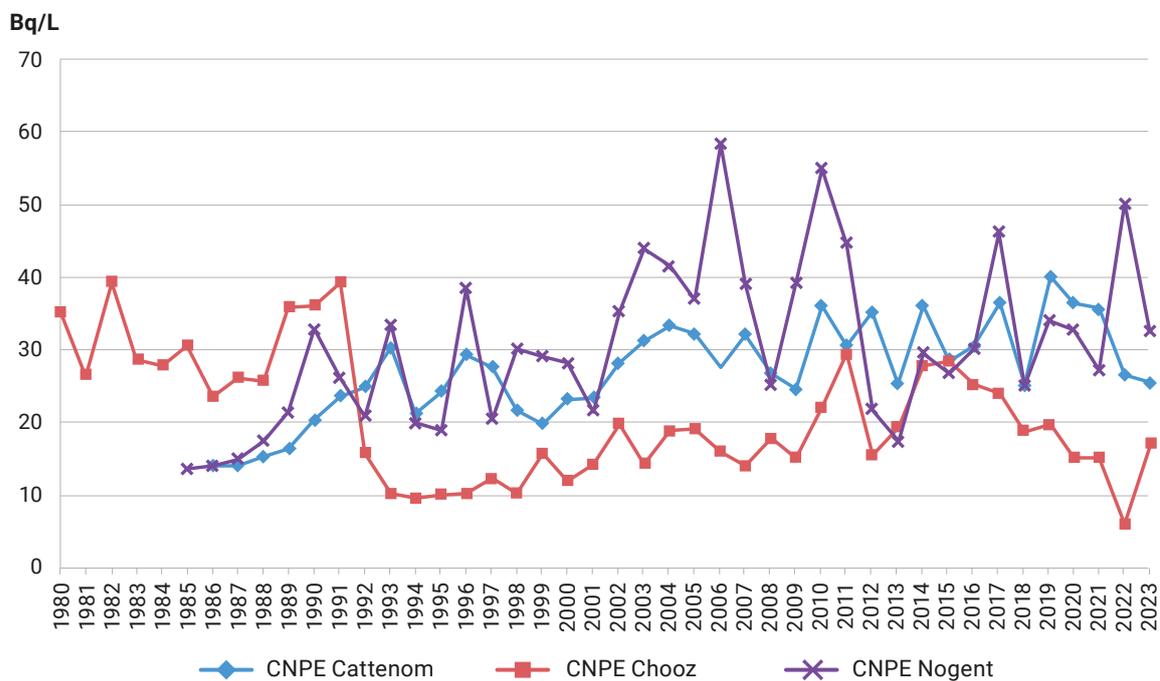


FIGURE 13 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES MOYENNES ANNUELLES DE TRITIUM DANS L'EAU DE LA GARONNE EN AVAL DU CNPE DE GOLFECH ET DE LA GIRONDE EN AVAL DE CELUI DU BLAYAIS (Bq/L)

L'implantation de l'hydrocollecteur 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 en raison d'une moindre dilution. L'activité de tritium dans l'eau de la Garonne en aval de Golfech, est passée d'un peu plus d'une dizaine de Bq/L au début des années 1990 à 5 Bq/L en 2018. Depuis, les activités annuelles moyennes de tritium dans l'eau de la Garonne prélevée en aval du CNPE de Golfech varient entre 5 et 15 Bq/L.

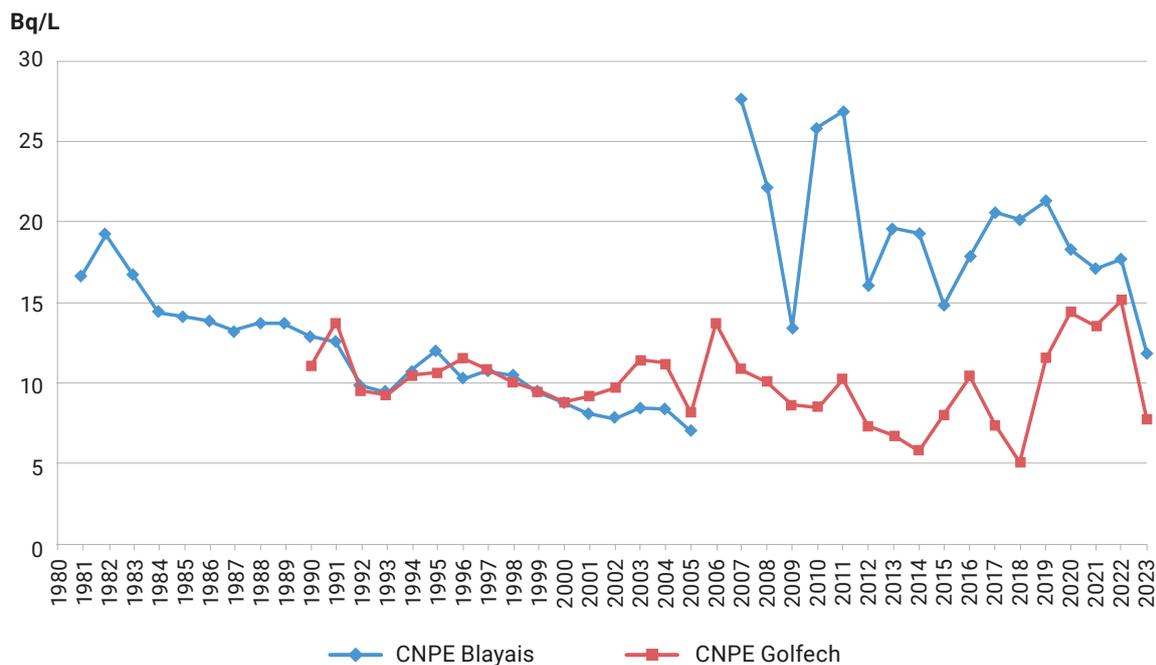
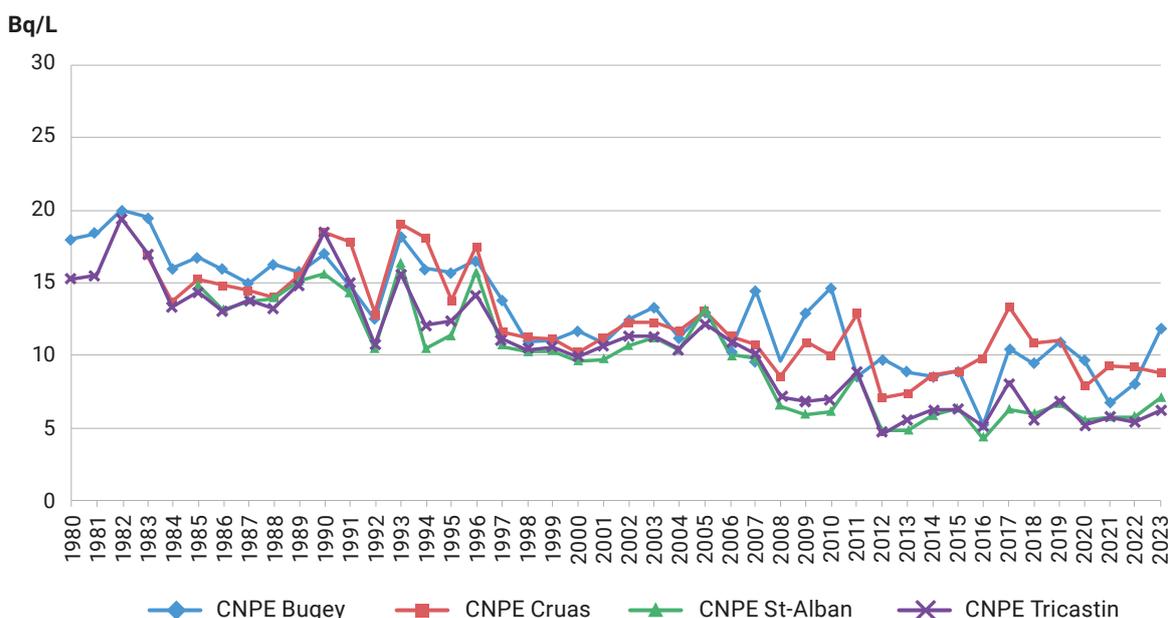


FIGURE 14 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES MOYENNES ANNUELLES DE TRITIUM DANS L'EAU DU RHÔNE EN AVAL DES CNPE DE BUGEY, SAINT-ALBAN, CRUAS ET TRICASTIN (Bq/L)

Depuis le début des années 1980, l'activité de tritium des eaux du Rhône en aval des CNPE a diminué d'un facteur 3 à 4. 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 un seuil de décision de 1 Bq/L. L'objectif de l'IRSN est de quantifier l'activité de l'eau qui se situe très en dessous des limites réglementaires (activité volumique moyenne journalière de 140 Bq/L en présence d'un rejet et 100 Bq/L sinon ; décision n° 2017-DC-0588 de l'ASN du 6 avril 2017).



Ces moyennes annuelles masquent une variabilité temporelle importante. La figure 15 présente la variabilité des moyennes mensuelles des activités de tritium dans les cours d'eau en aval des CNPE entre 2021 et 2023. En raison d'un débit important et relativement constant, c'est dans le Rhône que les activités sont à la fois les plus faibles et les moins fluctuantes. C'est dans la Loire en aval du CNPE de Dampierre-en-Burly que ces fluctuations mensuelles sont les plus importantes pouvant passer de quelques Bq/L à plus de 100 Bq/L.

La figure 16 montre les fluctuations quotidiennes des activités de tritium mesurées par EDF à l'aval du CNPE de Chinon entre 2021 et 2023. Ainsi, les activités fluctuent entre moins de 5 Bq/L (seuil de décision) à 97 Bq/L en août 2022 sous l'action combinée des rejets et des conditions hydrologiques particulières susceptibles par ailleurs de générer des hétérogénéités sur la largeur du fleuve à une même distance du site.

Nota : des activités volumiques plus élevées de tritium dans l'eau des cours d'eaux (rivières, fleuves) mesurées par EDF sont reportées dans le Réseau national de mesure. Il s'agit d'analyses réalisées sur des prélèvements ponctuels effectués au moment des rejets comme l'exige la réglementation (cf. prélèvement à mi-rejet du tableau 3-A p. 78 du *Bilan radiologique 2015-2017*) dans l'objectif de surveiller le bon déroulement des rejets d'effluents liquides. Très logiquement, puisque répondant à un autre objectif, 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.

FIGURE 15 / FLUCTUATION DES MOYENNES MENSUELLES DES ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM MESURÉES PAR EDF DANS LES COURS D'EAU EN AVAL DES CNPE POUR LA PÉRIODE 2021-2023 (Bq/L)

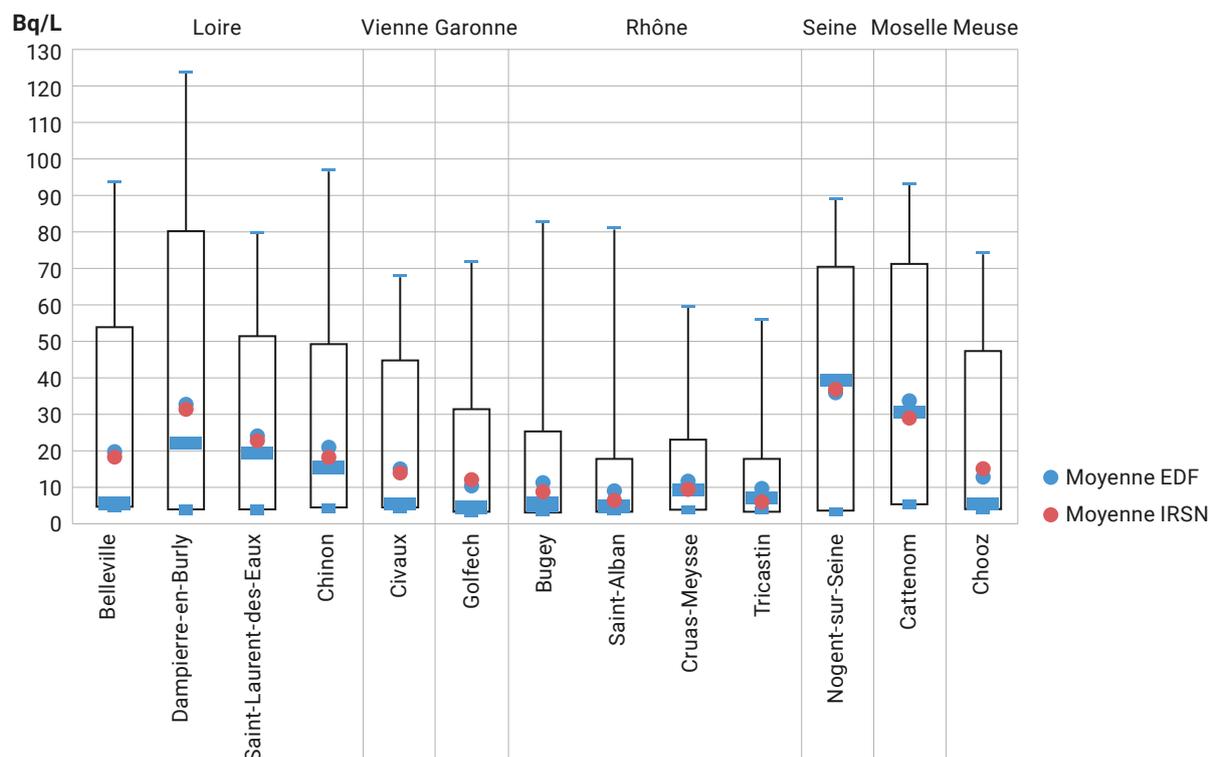
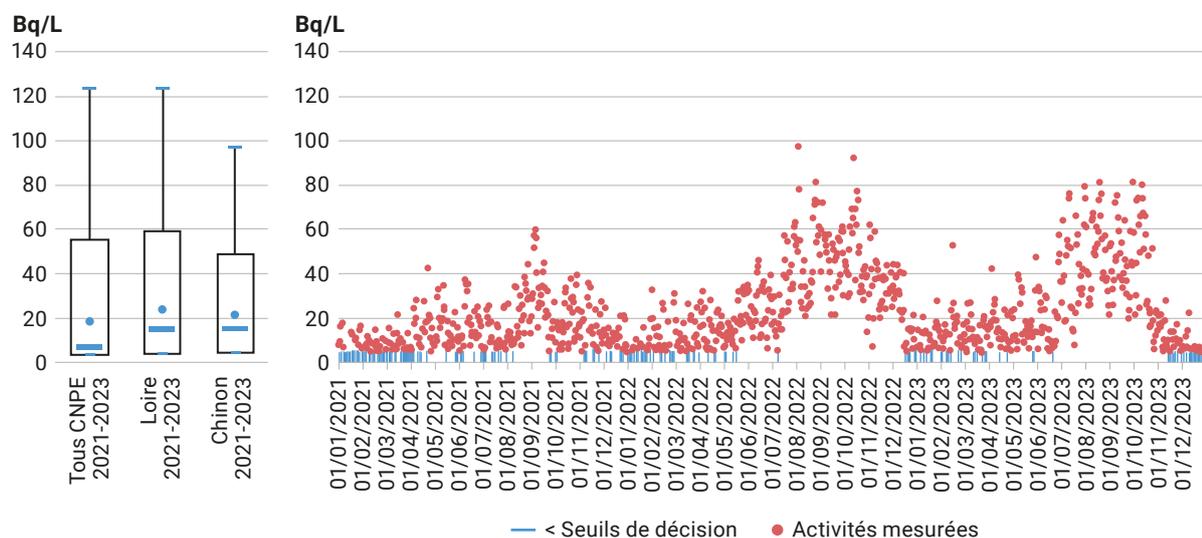


FIGURE 16 / FLUCTUATION DES ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM MESURÉES QUOTIDIENNEMENT (EDF) DANS LA LOIRE EN AVAL DE CHINON ENTRE 2021 ET 2023 (Bq/L)



Les activités de tritium dans les poissons des cours d'eau qui reçoivent les rejets d'effluents des CNPE sont mesurées dans le cadre de la surveillance réglementaire. Les figures 17 et 18 montrent que les évolutions des activités de tritium des poissons pêchés au fil du Rhône et de la Loire présentent des allures tout à fait similaires à celles relatives au carbone-14 présentées précédemment (figures 8 et 9) : des augmentations en aval de chaque CNPE et des diminutions après des confluences majeures (Saône, Ain, Isère et Durance dans le cas du Rhône et Cher dans le cas de la Loire) en raison de l'augmentation du débit du cours d'eau qui favorise la dilution des radionucléides rejetés. Tout au long du Rhône, la mise en perspective des activités sur les périodes 2001-2011, 2012-2017 et 2018-2023 montre une diminution notable, ces dernières années, des activités dans les poissons pêchés en amont et en aval des CNPE. Cette tendance est très marquée à l'aval du CNPE de Tricastin.

Tout au long de la Loire, la mise en perspective des activités sur les périodes 2010-2015, 2016-2018 et 2019-2021 montre la stabilité dans le temps de cette influence, malgré des augmentations observées en certains points pour la période 2021-2023. La figure 18 présente également des activités massiques de tritium dans des poissons pêchés à l'aval proche des points de rejets liquides des CNPE de la Loire lors d'une campagne réalisée spécifiquement par l'IRSN en 2021 (à Beaulieu-

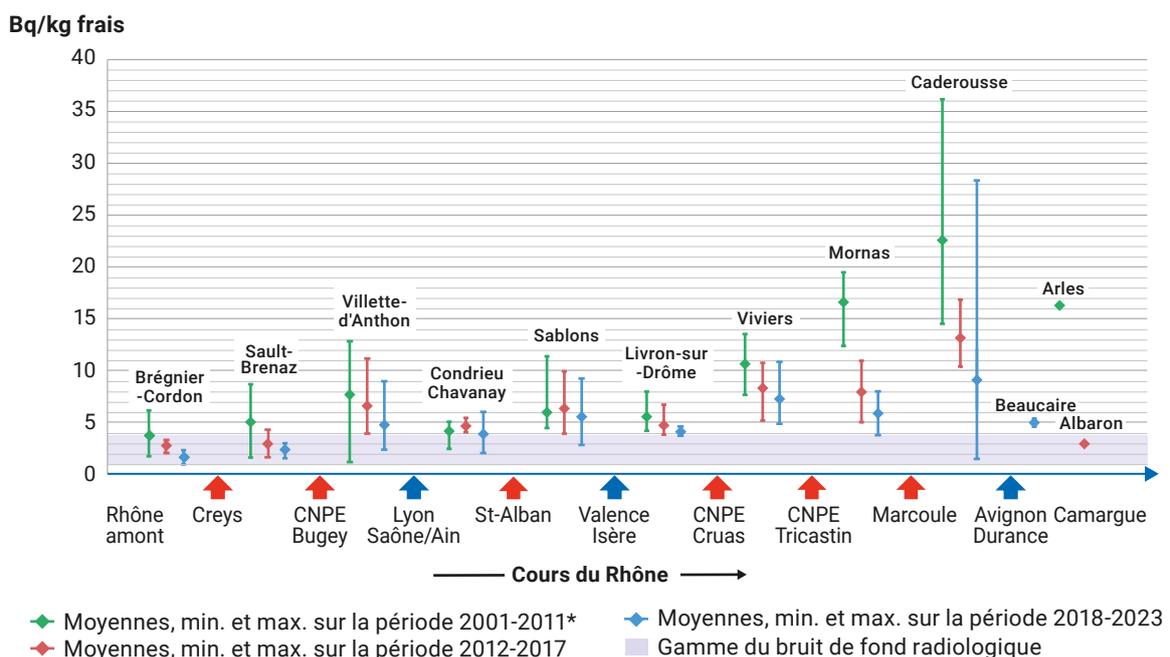
sur-Loire, Ouzouer-sur-Loire, Courbouzon et Chouzé-sur-Loire). Ces activités sont, comme attendu, plus élevées que celles mesurées dans les poissons pêchés dans le cadre de la surveillance réglementaire car elles sont représentatives d'une portion du fleuve où les rejets liquides des CNPE ne se sont pas encore dilués de manière complètement homogène dans l'eau du fleuve.

La figure 19 montre, comme pour le carbone-14 (figure 10), la plus faible capacité de certains cours d'eau à disperser les rejets d'effluents des CNPE. Par exemple, les poissons pêchés dans la Moselle en aval du CNPE de Cattenom, présentent des activités supérieures à celles mesurées dans le Rhône en aval de l'ensemble des CNPE.

La dose due au tritium suite à la consommation de poissons est tout à fait négligeable au regard de celle attribuable au carbone-14.

Les rejets de tritium et de carbone-14 sous forme liquide des CNPE de Flamanville, Paluel, Penly et Gravelines se font en Manche. Les activités de ces radionucléides, mesurées dans le cadre de la surveillance de l'IRSN et dans celui du suivi radioécologique réalisé pour EDF, montrent que l'influence des rejets liquides des CNPE n'est pas discernable, même localement, de celle des rejets d'Orano La Hague qui sont plus de 150 fois supérieurs.

FIGURE 17 / PROFIL D'ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ MASSIQUE DE TRITIUM DANS LES POISSONS (Bq/kg frais), TOUT AU LONG DU COURS DU RHÔNE, ÉTABLIE SUR LA BASE DES MESURES RÉALISÉES SUR LES PÉRIODES 2001-2011 (en vert), 2012-2017 (en rouge) ET 2018-2023 (en bleu)



* Avant 2009, les données ne portent que sur certaines années (bilans décennaux et études spécifiques).

FIGURE 18 / PROFIL D'ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ MASSIQUE DE TRITIUM DANS LES POISSONS (Bq/kg frais), TOUT AU LONG DU COURS DE LA LOIRE, ÉTABLIE SUR LA BASE DES MESURES RÉALISÉES SUR LES PÉRIODES 2010-2015 (en vert), 2016-2018 (en rouge) ET 2018-2021 (en bleu)

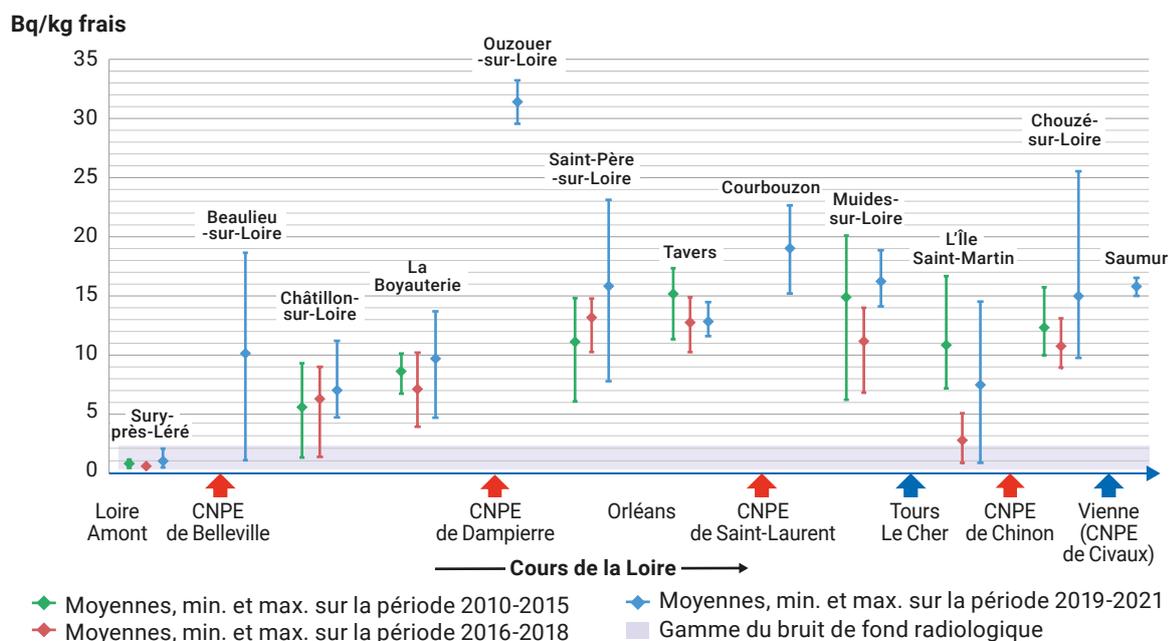
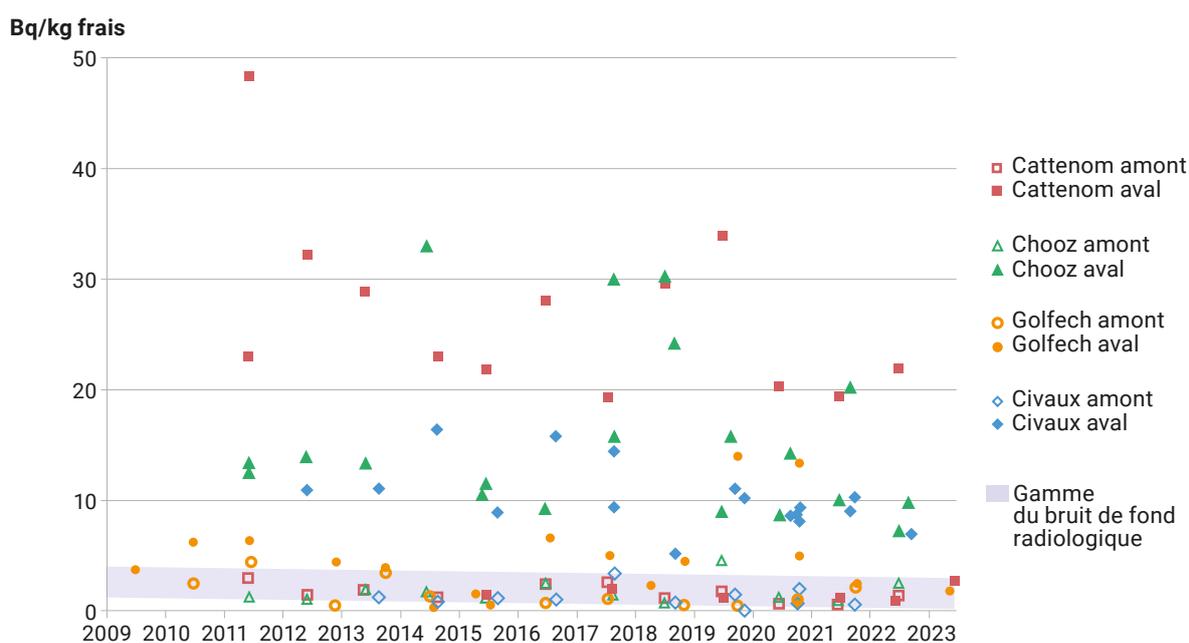


FIGURE 19 / ACTIVITÉ MASSIQUE DE TRITIUM DANS LES POISSONS PÊCHÉS EN AVAL DE CATTENOM, CHOOZ, CIVAUX ET GOLFECH (Bq/kg frais)



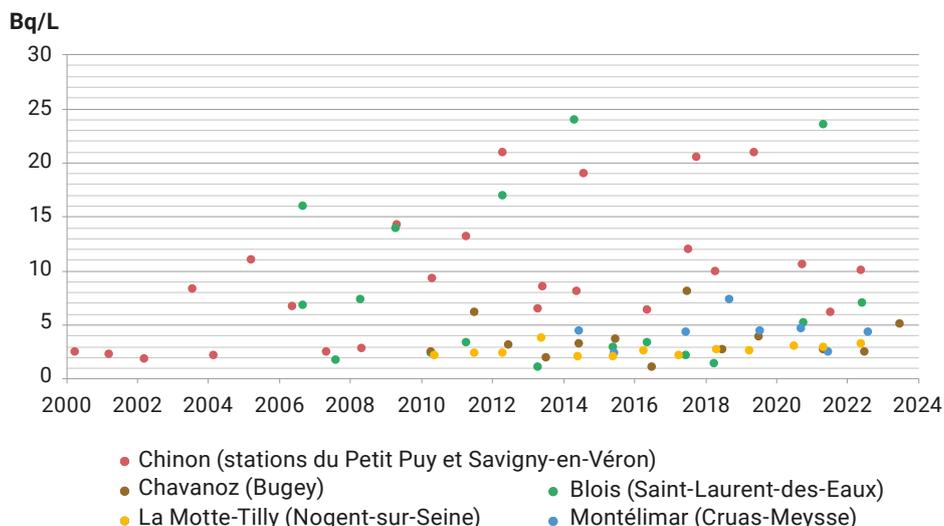
Influence des CNPE sur les activités de tritium dans les eaux de boisson

Des activités volumiques de tritium supérieures au bruit de fond peuvent être mesurées dans certaines eaux de boisson. Il s'agit presque toujours d'eaux de boisson d'origine fluviale. Le tritium, du fait de ses propriétés physico-chimiques, n'est pas arrêté par les traitements de potabilisation contrairement à d'autres radionucléides. Il en résulte que la teneur en tritium d'une eau de boisson d'origine fluviale peut approcher dans certains cas celle mesurée dans le cours d'eau en relation avec la nappe phréatique dans laquelle elle a été pompée. Parmi les eaux de boisson surveillées, la figure 20 présente les résultats obtenus dans celles où les activités de tritium mesurées sont régulièrement les plus élevées. Bien que les niveaux d'activité et les fluctuations soient moins importants que dans les eaux des fleuves concernés, on observe que l'eau de boisson prélevée à Blois est passée de 1 Bq/L en avril 2013 à 24 Bq/L en avril 2014 pour revenir à 3 Bq/L en avril 2015. À titre indicatif, on rappelle que la valeur guide de potabilité du tritium dans les eaux de consommation préconisée par l'OMS est de 10 000 Bq/L.

Si les activités de tritium dans les eaux souterraines à l'intérieur du périmètre de certains CNPE peuvent être très supérieures au bruit de fond (cf. *Bilan radiologique 2018-2020* p. 127 et pp. 351-358), à l'extérieur, les eaux de boisson d'origines souterraines consommées par les populations résidant dans l'environnement des CNPE présentent presque toujours des activités non mesurables ou dans la gamme du bruit de fond. Il faut rappeler que des ouvrages, tels que des barrières hydrauliques, sont mis en place pour s'assurer que les activités plus élevées des eaux souterraines en tritium restent circonscrites à l'intérieur du site et ne se propagent pas en dehors.

Les doses liées à l'incorporation de tritium par ingestion d'eau, estimées sur la base des activités mesurées dans l'eau des cours d'eau, sont donc majorantes, et même très majorantes dans le cas des eaux de boisson d'origine phréatique, de celles effectivement reçues par les populations résidant dans l'environnement des CNPE. Pour la période 2021-2023 et pour une consommation de 2 L/j sur une année, les doses seraient comprises entre 0,07 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en aval du Tricastin et 0,7 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en aval de Nogent. Ces estimations sont du même niveau (ou inférieures pour les plus élevées) que celles évaluées par EDF par calculs à partir des activités rejetées en 2022 : de 0,02 à 3 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour Tricastin et Cattenom respectivement.

FIGURE 20 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM (Bq/L) LES PLUS ÉLEVÉES MESURÉES DANS DES EAUX DE BOISSON PRÉLEVÉES DANS LES COMMUNES SITUÉES AUTOUR DES CNPE DEPUIS 2000



Influence des rejets liquides d'autres radionucléides

En milieu fluvial, les radionucléides émetteurs gamma font l'objet d'une analyse mensuelle par l'IRSN via les boues de décantation des eaux collectées par les 20 hydrocollecteurs situés sur les grands cours d'eau qui reçoivent les rejets des installations nucléaires. Les activités mesurées dans ces boues sont représentatives de celles des particules en suspension dans l'eau, notamment pour les radionucléides qui sont transportés majoritairement sous forme particulaire dans les cours d'eau (d'autres comme le tritium ou les antimoine-124 et 125 se présentent sous forme dissoute). Comme pour la période 2018-2020, les principaux radionucléides émetteurs gamma qui sont présents dans les rejets d'effluents liquides des CNPE ont été détectés au moins une fois sur la période 2021-2023. Comme attendu, le cobalt-60, qui est le plus rejeté en termes d'activité pour cette famille de radionucléides, est aussi le plus fréquemment détecté (42 % des analyses) dans les boues des hydrocollecteurs de l'IRSN, avec les activités les plus élevées (jusqu'à 86 Bq/kg sec). Il est suivi, comme pour les rejets, de l'argent-110m (31 % de détection avec une activité massique maximale de 53 Bq/kg sec) et du cobalt-58 (9 % de détection avec une activité massique maximale de 11 Bq/kg sec). Le manganèse-54, beaucoup moins rejeté par les CNPE, n'est détecté que rarement (3 % avec une activité massique maximale de 5,6 Bq/kg sec). La fréquence de détection quasi systématique du césium-137 (99 %) est liée à sa présence dans le bruit de fond radiologique français comme rémanence des retombées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl. Les fortes activités d'iode-131 mesurées (jusqu'à 92 Bq/kg sec) sont principalement liées aux rejets hospitaliers en aval des grands centres de médecine nucléaire. Elles sont par ailleurs souvent plus élevées en amont du CNPE qu'en aval. Ces fréquences de détection et ces activités sont proches de celles observées pour la période du précédent *Bilan radiologique 2018-2020*. En revanche, contrairement à la période précédente, aucun autre radionucléide présent dans les rejets liquides des CNPE continentaux n'a été mesuré. Dans les boues de décantation récoltées à l'aval des CNPE marins, les mêmes radionucléides sont mesurés : le césium-137 (96 % de détection) avec une activité massique maximale de 5,3 Bq/kg sec, le cobalt-60 (94 %) avec une activité massique maximale de 15,2 Bq/kg sec, le cobalt-58 (29 %) avec une activité massique maximale de 10,2 Bq/kg sec, l'argent-110m (28 %) avec une activité massique maximale de 7,3 Bq/kg sec et le manganèse-54 (2 %) avec une activité massique maximale de 1,1 Bq/kg sec.

Enfin, il faut noter la présence d'iode-129, mesurée significativement autour des 4 CNPE marins (entre 4 % de détection à Flamanville et 19,3 % à Gravelines) avec des activités massiques comprises entre 0,15 et 4 Bq/kg sec qui témoignent vraisemblablement de l'influence des rejets des sites de La Hague en France et de Sellafield au Royaume-Uni.

Des radionucléides émetteurs gamma issus des rejets liquides des CNPE continentaux, autres que le césium-137 et l'iode-131, sont également décelés dans les plantes (plantes aquatiques), plus rarement dans les sédiments, très exceptionnellement dans les muscles des poissons, et seulement au moyen des meilleures techniques disponibles mises en œuvre dans le cadre d'études d'expertise réalisées par l'IRSN et celles dites « radioécologiques » mises en place par EDF autour de ses CNPE. Il s'agit régulièrement du cobalt-60 et du cobalt-58, ponctuellement du manganèse-54 et de l'argent-110m, et plus rarement du césium-134. Sur la période 2021-2023 le césium-134 et l'argent-110m ont été mesurés respectivement, à l'état de traces, dans un échantillon des muscles des poissons pêchés en aval du CNPE de Chinon (0,019 Bq/kg frais) et dans un échantillon de poissons entiers pêchés en aval du CNPE de Bugey (0,025 Bq/kg frais). Les figures 21A, 21B et 22 présentent les activités massiques de cobalt-60 et cobalt-58 mesurées dans les plantes aquatiques prélevées en différents points du Rhône, de la Loire et en aval des CNPE de Nogent, Chooz et Cattenom depuis 2008. Après la baisse importante des rejets intervenue au cours des années 1980-1990 qui ont atteint un niveau plancher, les activités massiques sont maintenant assez constantes, très majoritairement comprises entre 0,01 et 2 Bq/kg sec ces dernières années. Dans le Rhône, les activités les plus élevées sont souvent mesurées en aval de Bugey en raison d'un débit du Rhône encore faible qui assure une moindre dispersion. Toutefois, depuis 2018, elles sont nettement moins élevées que les années précédentes et en 2022, elles restent inférieures aux seuils de décision. L'influence des rejets d'un CNPE peut être mesurable sur plusieurs dizaines de kilomètres comme en témoignent les résultats des prélèvements réalisés en amont de Saint-Alban (rejets de Bugey), de Cruas et de Tricastin.

L'argent-110m, qui était souvent mesuré en aval de Bugey n'est quasiment plus décelé depuis 2020. En revanche, l'argent-110m et le manganèse-54, sont mesurés dans les plantes aquatiques prélevées à différents points de la Loire (figure 23). Dans ces composantes du milieu aquatique, de l'iode-131 peut être mesuré irrégulièrement et à des niveaux très variables. Comme pour les boues de décantation, la présence de ce radionucléide résulte principalement des rejets hospitaliers qui sont à rapprocher des utilisations thérapeutiques et diagnostiques de ce radionucléide.

FIGURE 21A / ACTIVITÉS MASSIQUES DE COBALT-58 ET DE COBALT-60, SUPÉRIEURES AUX SEUILS DE DÉCISION, DANS LES PLANTES AQUATIQUES (mousses et phanérogames) COLLECTÉES EN DIFFÉRENTS POINTS DU RHÔNE (Bq/kg sec)

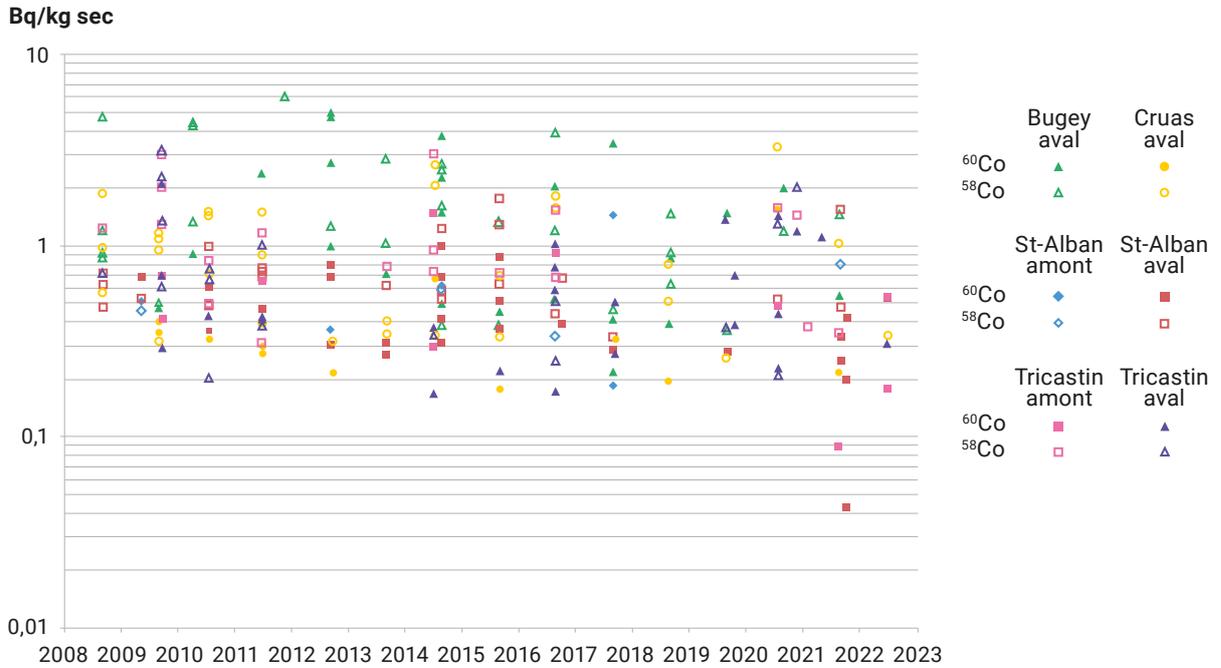


FIGURE 21B / ACTIVITÉS MASSIQUES DE COBALT-58 ET DE COBALT-60, SUPÉRIEURES AUX SEUILS DE DÉCISION, DANS LES PLANTES AQUATIQUES (mousses et phanérogames) COLLECTÉES EN DIFFÉRENTS POINTS DE LA LOIRE (Bq/kg sec)

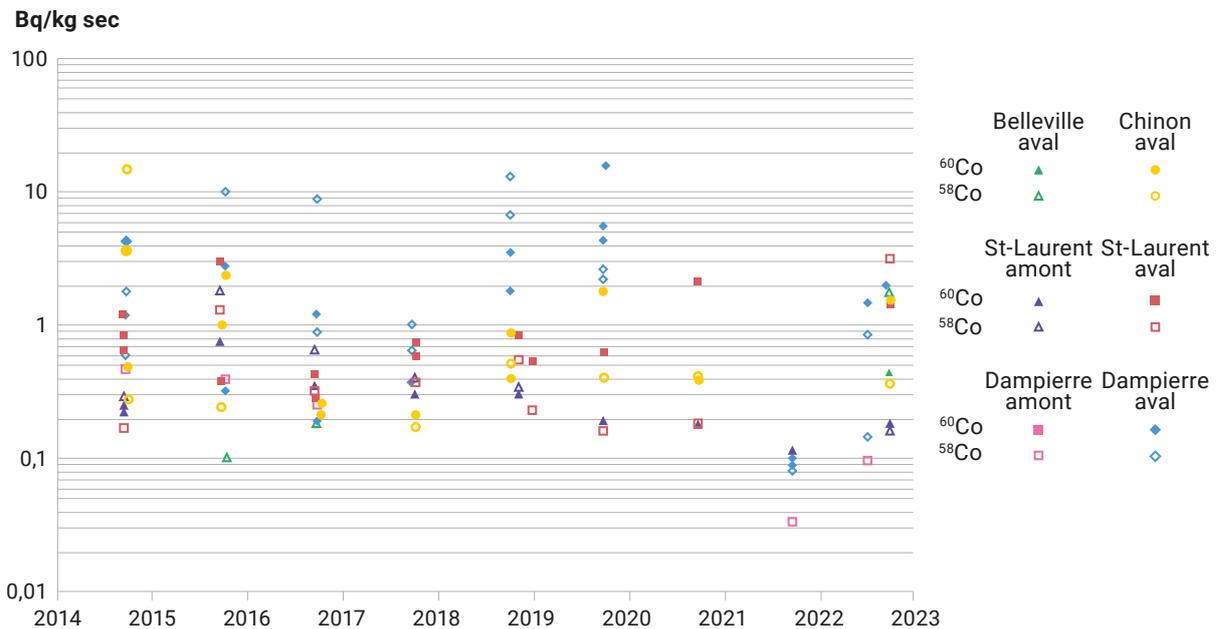


FIGURE 22 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE COBALT-58 ET DE COBALT-60, SUPÉRIEURES AUX SEUILS DE DÉCISION, DANS LES PLANTES AQUATIQUES (mousses et phanérogames) DANS LA SEINE, LA MEUSE ET LA MOSELLE EN AVAL DES CNPE DE NOGENT, CHOOZ ET CATTENOM (Bq/kg sec)

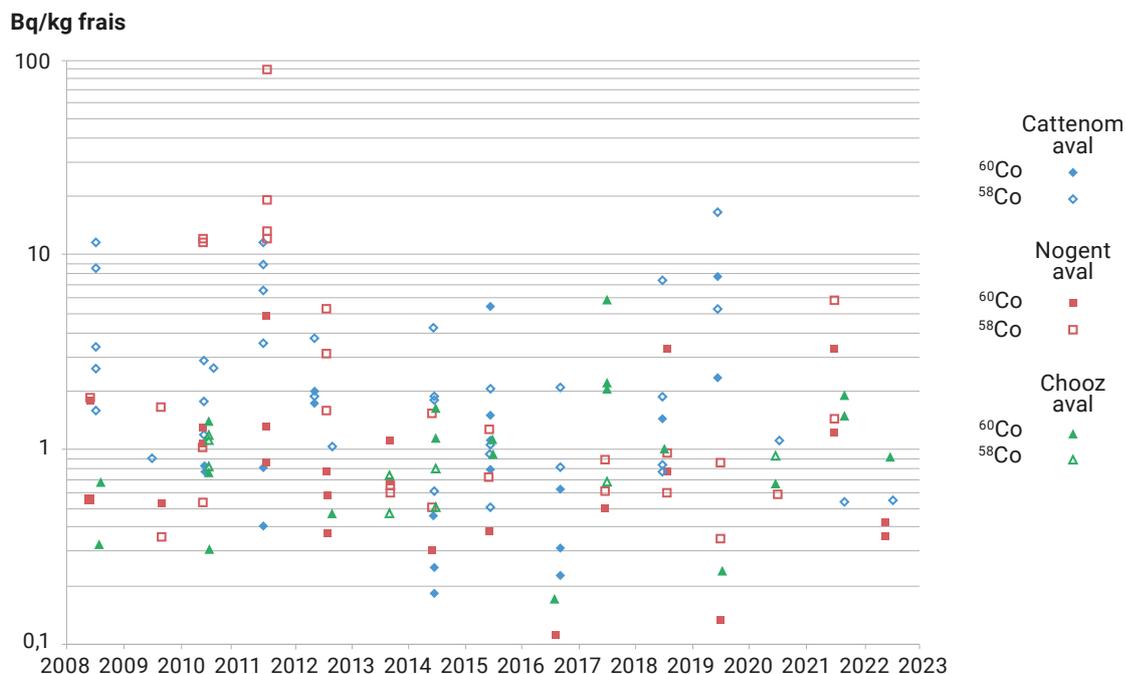
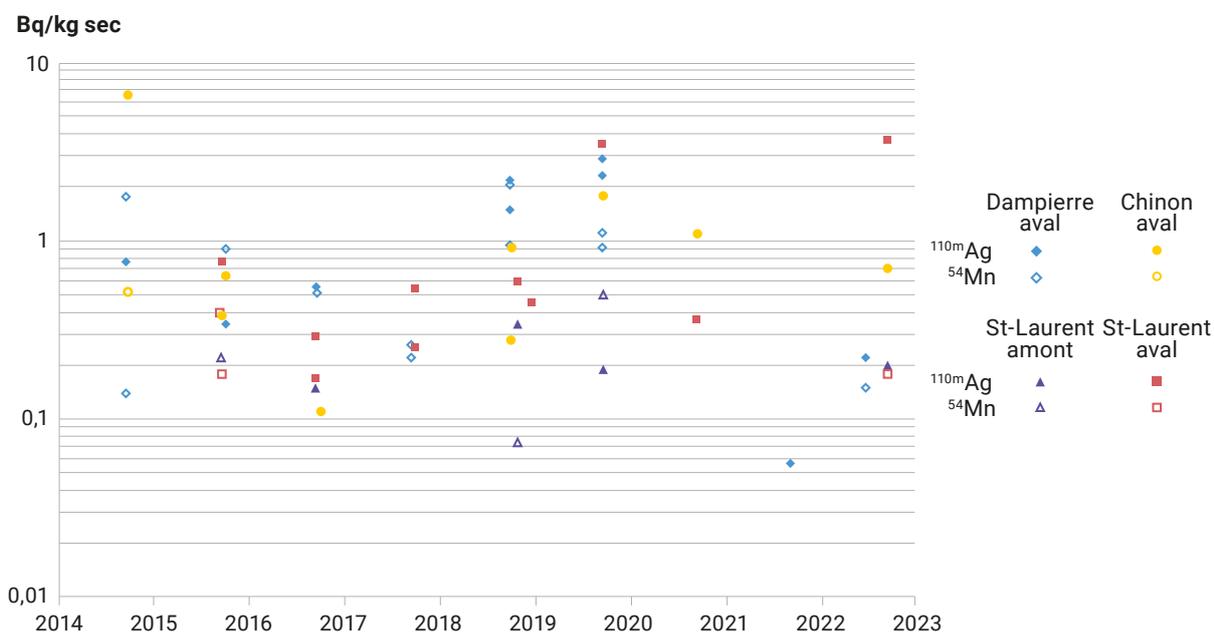


FIGURE 23 / ACTIVITÉS MASSIQUES D'ARGENT-110m ET DE MANGANÈSE-54, SUPÉRIEURES AUX SEUILS DE DÉCISION, DANS LES PLANTES AQUATIQUES (mousses et phanérogames), COLLECTÉES EN DIFFÉRENTS POINTS DE LA LOIRE (Bq/kg sec)



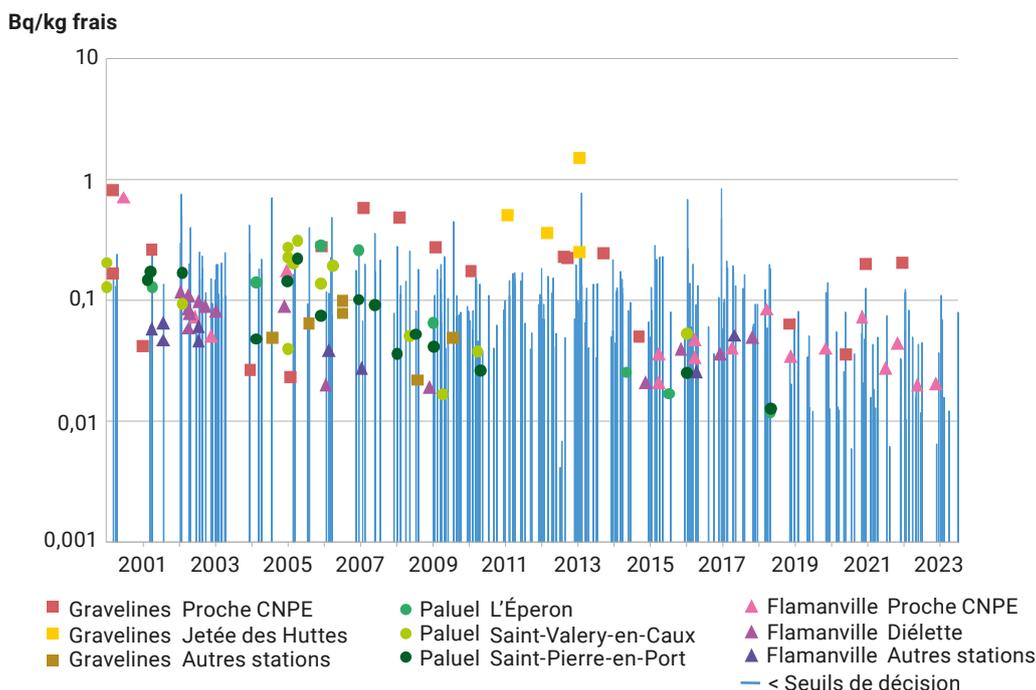
Enfin, les radionucléides mesurés en Manche, y compris au voisinage des CNPE, sont principalement imputables aux rejets liquides des installations d'Orano La Hague ou de l'usine de Sellafield (Grande-Bretagne, chapitre 2.3 La Hague). La contribution vraisemblablement très faible des rejets d'effluents liquides des CNPE n'est pas distinguable par la mesure, à l'exception de l'argent-110m rejeté plus spécifiquement par ces installations. Dans le cadre de la surveillance de routine effectuée par l'IRSN, ce radionucléide est recherché et caractérisé dans les matières en suspension ou les boues de décantation prélevées dans les émissaires de rejets (canaux ou puits), à des activités massiques pouvant atteindre quelques Bq/kg de matière sèche (valeur maximale de 7,3 Bq/kg sec mesurée dans le canal marin de Gravelines en mars 2022).

Dans l'environnement, à de très rares exceptions près, l'activité de ce radionucléide dans les algues et sédiments est trop faible pour être quantifiée. Ainsi, s'il avait pu être mesuré dans un échantillon d'algues (0,17 Bq/kg sec) et deux échantillons de sables (0,5 et 0,2 Bq/kg sec) prélevés en Manche entre 2018 et 2020, cela n'a plus été le cas dans les 99 échantillons d'algues et les 32 échantillons de sédiments et sables prélevés depuis 2021. De même, les 286 analyses effectuées depuis 2001 dans les poissons n'ont jamais permis de quantifier l'activité massique d'argent-110m et montrent qu'elles sont le plus souvent inférieures à 0,04 Bq/kg frais.

L'argent-110m est en revanche mesuré en moyenne une fois sur quatre analyses dans les coquillages (moules, patelles, huîtres...) et les crustacés (crevettes, crabes, araignées de mer). Les activités n'étant pas significativement différentes d'un type de denrées à l'autre, la figure 24 présente les résultats acquis sur l'ensemble des denrées prélevées autour des sites de Flamanville, Paluel et Gravelines (remarque : autour de Penly les activités massiques étant plus faibles et très rarement mesurables ; elles n'ont pas été représentées sur la figure). Les activités massiques sont presque toutes comprises entre 0,01 et 1 Bq/kg frais, avec des fluctuations très importantes au niveau d'une même station de prélèvement. L'activité massique la plus élevée au cours des 23 dernières années est de 1,5 Bq/kg frais dans des patelles prélevées à la jetée des Huttes en 2013, à proximité immédiate du CNPE de Gravelines, où sont observées de manière générale les activités les plus élevées.

Même pour un gros consommateur de fruits de mer (31 kg/an de mollusques, 61 kg/an de crustacés), la dose potentiellement liée à l'incorporation l'argent-110m sur la base de tous les résultats acquis au cours des 23 dernières années, serait très faible : le plus souvent inférieures à 0,01 μ Sv/an et jusqu'à 0,05 μ Sv/an si l'on considère que tous les fruits de mer consommés sont aux niveaux d'activité des deux échantillons présentant les activités massiques les plus importantes prélevés ces trois dernières années

FIGURE 24 / ACTIVITÉS MASSIQUES D'ARGENT-110m DANS DES MOLLUSQUES ET DES CRUSTACÉS PRÉLEVÉS EN MANCHE À PROXIMITÉ DES CNPE DEPUIS 2000 (Bq/kg frais)



(soit 0,2 Bq/kg frais mesurés en 2021 et 2022 dans des huîtres collectées à proximité du CNPE de Gravelines).

Ces estimations sont du même ordre que celles faites par EDF, par calculs (modélisation) à partir des activités de l'argent-110m rejetées en Manche en 2021 et 2022, pour de gros consommateurs de fruits de mer provenant des environs des sites de Paluel, Penly et Flamanville : entre 0,02 et 0,05 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

Conclusion générale

Parmi les milliers de résultats de mesure acquis par l'IRSN et EDF dans le cadre de la surveillance de l'environnement des CNPE d'EDF sur la période 2021-2023, une seule valeur atypique a été décelée. Il s'agit d'une activité volumique de cobalt-60 dans l'air de 20,8 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, nettement plus élevée que les valeurs maximales attendues, mesurée sur le filtre prélevé à la station de l'IRSN installée à 1 km du CNPE de Civaux en janvier 2023. Par ailleurs, tous les dépassements de l'indice d'activité bêta global de référence dans l'air (seuil d'investigation fixé par la réglementation à 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.

À l'exception de l'évènement significatif en radioprotection du 13 janvier 2023 à Civaux (chapitre 4.4), aucun autre des évènements significatifs déclarés par EDF sur la période 2021-2023 pour l'ensemble des CNPE n'a pu avoir, selon l'IRSN, de conséquence sur l'environnement, et n'a, de fait, été décelé dans le cadre de la surveillance. Les activités mesurées dans toutes les composantes de l'environnement autour des CNPE au cours des années 2021-2023 sont conformes à celles attendues et présentent une relative stabilité par rapport aux années précédentes. Le carbone-14 et le tritium, qui sont les deux radionucléides les plus abondants dans les rejets d'effluents en termes d'activité rejetée, sont les seuls pour lesquels l'influence des CNPE peut être mesurée dans la plupart des composantes des milieux terrestre et aquatique continental, notamment dans les denrées.

Les activités mesurées dans l'air et en milieu terrestre montrent que l'influence des rejets réalisés dans l'atmosphère diminue très rapidement avec la distance au site, notamment dans les 5 premiers kilomètres, et n'est plus discernable du bruit de fond radiologique à partir de 10 kilomètres. L'exposition par inhalation d'air est extrêmement faible et négligeable au regard de l'exposition potentielle liée à la consommation de denrées locales, elle-même très faible. La dose qui résulterait de cette consommation, en supposant que les denrées d'origine locale consommées soient

produites dans un rayon de 5 km autour du site, serait de l'ordre de 0,1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette dose est quasiment exclusivement liée au carbone-14.

L'influence des rejets d'effluents liquides contenant du carbone-14 et du tritium est visible en aval de tous les CNPE. Elle est mesurée dans toutes les composantes du milieu aquatique pour le tritium et dans les poissons pour le carbone-14. La dose moyenne résultant d'une consommation occasionnelle de poissons liée à une activité de pêche de loisir en aval des CNPE fluviaux est estimée à moins de 0,5 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Elle est quasi exclusivement imputable au carbone-14 et ne représente, à titre de repère, que quelques pourcents de la dose totale liée à la consommation de poissons résultant de leur radioactivité naturelle, tous radionucléides confondus, estimée à 12 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

La consommation d'eau de boisson d'origine fluviale en aval des CNPE conduirait à une dose comprise entre 0,07 et 0,7 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en lien avec la présence de tritium.

En raison d'activités extrêmement faibles, les radionucléides présents dans les rejets des CNPE, autres que le carbone-14 et le tritium (^{60}Co et $^{110\text{m}}\text{Ag}$ notamment) ne sont mesurables que dans l'air et dans certaines composantes des milieux aquatiques continental et marin, en mettant en œuvre les meilleures techniques disponibles. Les doses associées sont négligeables au regard de celles liées au tritium et au carbone-14 déjà faibles. Même s'il existe une potentielle contribution des rejets des CNPE, les activités de césium-137 mesurées dans l'environnement des CNPE ont quant à elles pour origines majoritaires les retombées de l'accident de Tchernobyl et des essais atmosphériques d'armes nucléaires (chapitre 1).

Les activités mesurées dans l'environnement des CNPE et les estimations des doses susceptibles d'en résulter pour la population locale présentées dans ce bilan sont très proches de celles estimées dans les *Bilans radiologiques* précédents ; cela résulte de la constance globale des rejets de ces installations. Les doses estimées sont par ailleurs en bon accord avec les évaluations dosimétriques effectuées par EDF dans les rapports environnementaux annuels, établis par chacun des sites à partir des rejets réels des installations. Ces doses se situent plus de mille fois en dessous de la limite réglementaire de dose admissible en lien avec une exposition d'origine artificielle (hors exposition médicale) pour la population établie à 1 mSv/an dans le code de la santé publique (art. R. 1333-11).

Ces doses sont également à mettre en perspective de celles dues au bruit de fond radiologique français (chapitre 1.3).

FOCUS
SURVEILLANCE RADIOÉCOLOGIQUE
AUTOUR DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE
DE GRAVELINES

En complément de la surveillance régulière effectuée par l'IRSN, la Commission locale d'information (CLI) de la centrale nucléaire de Gravelines a mandaté l'Association de Gravelines a mandaté l'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest (ACRO) à trois reprises depuis 2010 pour une surveillance indépendante des niveaux de radioactivité dans l'environnement.

Bénéficiant d'une solide expérience dans ce domaine, le laboratoire de l'ACRO a étudié six stations, à la fois en champ proche et étendu, couvrant à la fois les compartiments marin et terrestre. Ces mesures visent à évaluer les niveaux de radioactivité environnementaux autour du CNPE de Gravelines au fil du temps, dans le but d'estimer leur évolution et de les comparer aux données de l'Observatoire citoyen de la radioactivité dans l'environnement mis en place par l'association le long du littoral normand.

FIGURE 1 / CARTOGRAPHIE DES SITES D'ÉTUDES AUTOUR DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE GRAVELINES



Que ce soit dans le compartiment marin ou dans le compartiment terrestre, une diversité d'indicateurs biologiques (mollusques, algues, mousses terrestres, légumes ou encore herbes) et inertes (sédiments grossiers et fins, sol, eau de mer ou eau douce) a été examinée.

FIGURE 2 / CAMPAGNE D'ÉCHANTILLONNAGE DES DIFFÉRENTS COMPARTIMENTS DE L'ENVIRONNEMENT



© CLI de Gravelines

Dans ces échantillons, de nombreux radionucléides couramment mesurés autour d'installations nucléaires ont été quantifiés, incluant les ^{129}I , ^{131}I , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{137}Cs , ^{241}Am , ^3H .

Les campagnes de surveillance radioécologique menées en 2010 et 2014 ont révélé des résultats significatifs. Sur le plan qualitatif, les radionucléides identifiés sont restés constants entre les deux périodes, à l'exception de la présence inhabituelle d'iode-131 à Oostende, pouvant être attribuée aux activités des services de médecine nucléaire. En termes quantitatifs, les activités mesurées dans les échantillons étaient globalement similaires et restaient en dessous des seuils d'alerte établis, à l'exception notable du cobalt-60 et de l'argent-110m quantifiés dans les moules près de la Jetée des Huttes, dépassant légèrement les niveaux attendus. Du point de vue géographique, aucune différence significative n'a été observée dans la répartition des radionucléides entre les années 2010 et 2014, soulignant ainsi une certaine stabilité dans la dispersion des éléments radioactifs dans l'environnement autour de la centrale nucléaire de Gravelines.

FIGURE 3 / LOCALISATION DES RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS IDENTIFIÉS, TOUS TYPES D'ÉCHANTILLONS CONFONDUS





Pour la campagne 2023, un total de 33 échantillons a été prélevé. Ce travail a permis d'actualiser et compléter les données acquises précédemment. Dans le compartiment terrestre, seul le césium-137 est détecté dans les sols. Son origine est principalement liée à la rémanence des retombées anciennes (Tchernobyl et essais nucléaires). Aucun radionucléide d'origine artificielle émetteur gamma n'est détecté dans les végétaux et les produits cultivés.

Dans le compartiment marin aucune singularité n'est à noter par rapport aux campagnes précédentes. Les niveaux observés sont du même ordre que ceux mesurés lors des précédentes campagnes, voire pour certains avec une présence plus faible (cas du ^{60}Co et $^{110\text{m}}\text{Ag}$).

Pour l'iode-129 uniquement rejeté par l'usine Orano à La Hague, les concentrations observées dans les algues sont cohérentes avec ce qui est observé plus en « amont » le long du littoral normand (suivi OCRE). Aucun radionucléide d'origine artificielle émetteur gamma n'est détecté dans les poissons ou les moules prélevés.

Les résultats de ces études sont disponibles sur le site de la CLI (<https://www.cli-gravelines.fr/>).

En plus de leur rôle complémentaire dans le domaine de la surveillance environnementale, ces campagnes revêtent une importance particulière en matière de sensibilisation du public. Elles sont ainsi valorisées et diffusées auprès des citoyens afin de les informer sur les rejets environnementaux et de les sensibiliser à l'importance de la radioprotection. C'est pourquoi des discussions territoriales par le biais de plénières autour des résultats et conclusions de la veille environnementale ont eu lieu permettant :

- de clarifier certaines modalités d'échantillonnage ;
- de préciser les conclusions et les interprétations des résultats obtenus ;
- d'évaluer la satisfaction des acteurs locaux quant à l'intérêt de ces mesures complémentaires ;
- de réfléchir collectivement aux modalités de financement de ces actions.



© CLI de Gravelines

Réunion publique réunissant les différents membres de la CLI de Gravelines.

2.2. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN COURS DE DÉCONSTRUCTION OU MIS À L'ARRÊT DÉFINITIVEMENT

Neuf réacteurs d'EDF sont actuellement en cours de déconstruction. Les sept d'entre eux qui se trouvent adossés à des sites ou des réacteurs en exploitation sont traités dans le chapitre 2.1. Le présent chapitre ne présente donc que les sites où aucun réacteur n'est en exploitation : Creys-Malville, Brennilis et Fessenheim.

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) : un réacteur à neutrons rapides (RNR) mis en service en 1985 puis mis à l'arrêt définitif en 1998 qui est actuellement en phase de déconstruction, et un ensemble d'installations dont l'atelier pour l'entreposage du combustible (APEC).

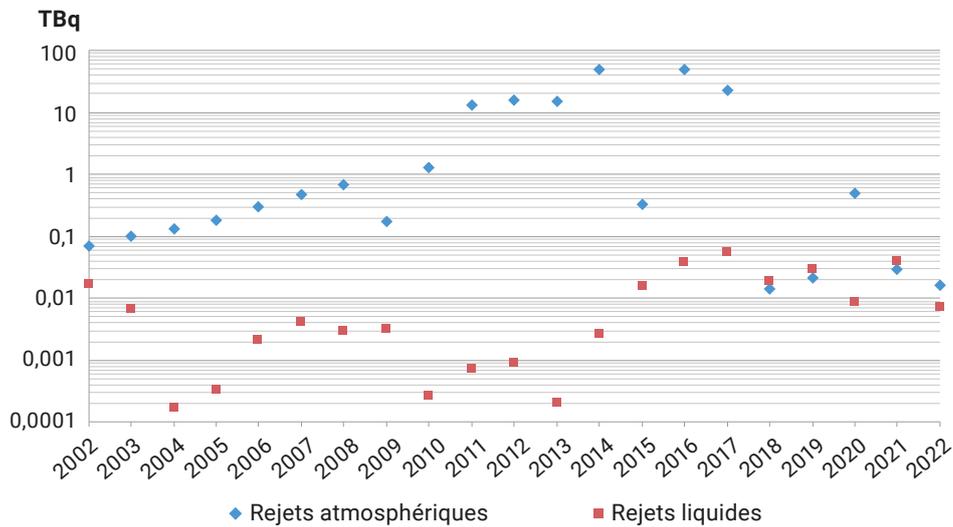
Rejets et surveillance de l'environnement

Conformément à la réglementation, le site de Creys-Malville dispose d'une autorisation spécifique pour rejeter des substances radioactives dans l'environnement (arrêté du 3 août 2007 autorisant l'exploitant du site à poursuivre les prélèvements d'eau et les rejets d'effluents liquides et dans l'atmosphère). Les rejets d'effluents radioactifs liquides proviennent d'une partie de l'eau utilisée dans les installations. Les rejets effluents radioactifs dans l'atmosphère proviennent de la ventilation des bâtiments. Le tritium constitue l'essentiel de l'activité rejetée : de 98 à 99,9 % de rejet liquide et dans l'atmosphère. Le tableau 1 présente les activités rejetées pour la période de 2018 à 2022 et la figure 1 présente l'évolution des rejets de tritium de 2002 à 2022. On note que l'activité des rejets liquides a atteint un maximum de 0,0549 TBq en 2017. Concernant les rejets dans l'atmosphère, on constate la hausse régulière des rejets tritiés de 2002 à 2017 avec un maximum de rejets de 48,3 TBq en 2016. Les variations à la hausse ou à la baisse des rejets de tritium sont liées aux opérations spécifiques de démantèlement réalisées sur la période concernée. Depuis le 26 août 2017, la limite annuelle de rejets tritiés dans l'atmosphère a diminué, elle est passée de 98 TBq/an à 2 TBq/an conformément à l'article 11 de l'arrêté du 3 août 2007 autorisant l'exploitant du site à poursuivre les prélèvements d'eau et les rejets d'effluents liquides et dans l'atmosphère. À cette date, les opérations de démantèlement conduisant à des rejets importants de tritium étaient achevées. Depuis le second semestre 2017, les opérations de démantèlement génèrent des rejets de tritium dans l'atmosphère plus faibles. Les opérations de démantèlement vont dorénavant générer plus de rejet de chlore-36 que de tritium.

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS REJETÉES PAR LES INSTALLATIONS DE CREYS-MALVILLE POUR LA PÉRIODE DE 2018 A 2022

	Unité	Activité rejetée				
		2018	2019	2020	2021	2022
Rejets radioactifs liquides						
Tritium	TBq	1,85.10 ⁻²	2,88.10 ⁻²	8,27.10 ⁻³	4,01.10 ⁻²	7,15.10 ⁻³
Hors tritium	GBq	4,31.10 ⁻²	3,56.10 ⁻²	2,39.10 ⁻²	5,75.10 ⁻²	2,00.10 ⁻²
Rejets radioactifs dans l'atmosphère						
Tritium	TBq	1,4.10 ⁻²	2,13.10 ⁻²	4,92.10 ⁻¹	2,90.10 ⁻²	1,57.10 ⁻²
Produits de fission ou d'activation	GBq	2,21.10 ⁻³	2,4.10 ⁻³	2,12.10 ⁻²	2,01.10 ⁻³	2,00.10 ⁻³
Gaz rares (⁸⁵ Kr)	GBq	-	-	-	-	-

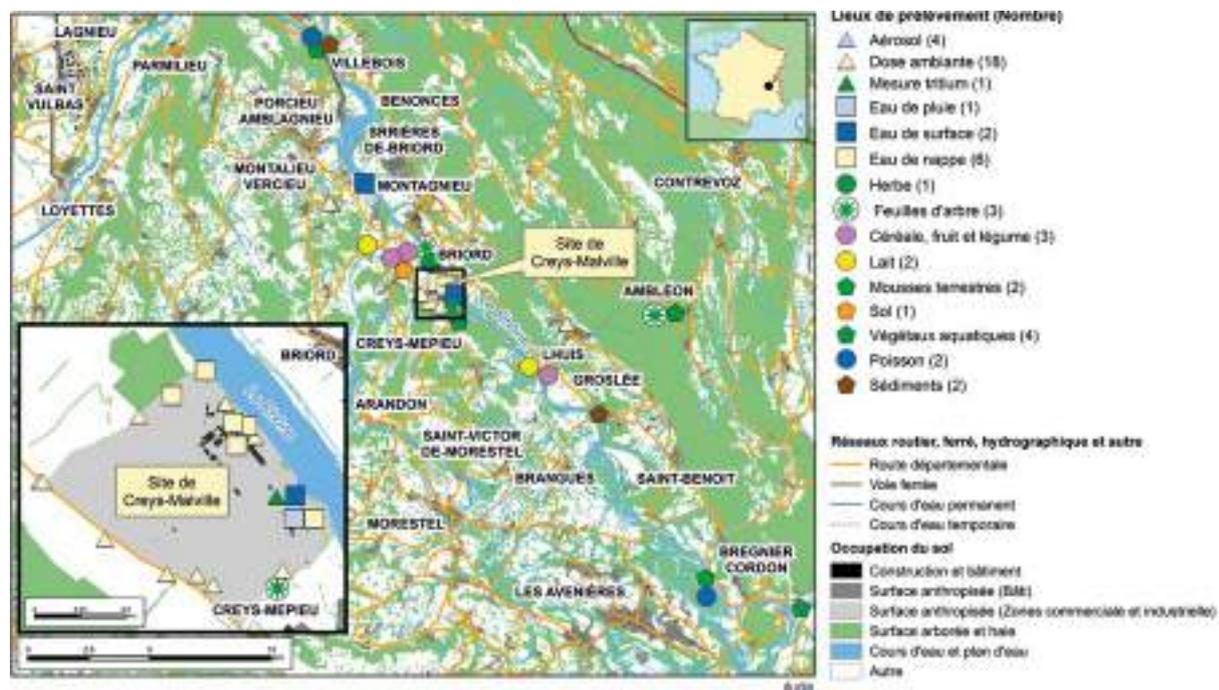
FIGURE 1 / ÉVOLUTION DES REJETS LIQUIDES ET ATMOSPHÉRIQUES DE TRITIUM DU SITE DE CREYS-MALVILLE DE 2002 À 2022 (TBq/an)



Comme mentionné au chapitre 1, les obligations réglementaires relatives à la surveillance de l'environnement sont fixées de manière générale par la décision n° 2013 DC-0360 de l'ASN du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base, modifiée par la décision n° 2016-DC-0569 du 29 septembre 2016, ainsi que par l'arrêté du 3 août 2007. La figure 2 et les tableaux 2A et 2B présentent le programme de surveillance de l'environnement du site de Creys-Malville réalisé par l'exploitant qui utilise des performances métrologiques cohérentes avec l'objectif de sa surveillance réglementaire. Cette surveillance permet d'une part de s'assurer du respect

des limites de rejets autorisées par les décisions en vigueur et du bon fonctionnement des installations, d'autre part d'observer l'influence éventuelle des rejets sur l'environnement. Des études radioécologiques annuelles confiées par EDF à l'IRSN viennent en complément des mesures réalisées en routine par le site de Creys-Malville. Ces études mettent en œuvre des techniques métrologiques plus performantes afin de caractériser sur le long terme l'évolution des niveaux de radioactivité mesurés dans les compartiments terrestres et aquatiques proches du site de Creys-Malville. L'IRSN réalise également une surveillance de l'environnement du site de Creys-Malville, son programme est détaillé dans le tableau 2A.

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



Le site de Creys-Malville

© EDF/Philippe Eranian

TABLEAU 2A / PLAN DE LA SURVEILLANCE RÉGLEMENTAIRE RÉALISÉE PAR EDF ET L'IRSN DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE CREYS-MALVILLE

Milieu surveillé ou nature du contrôle	EDF	IRSN
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> 10 balises en limite de site 4 balises à 1 km 4 balises à 5 km 	<ul style="list-style-type: none"> 1 balise TÉLÉRAY à proximité du site sous les vents dominants
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement et mesures quotidiennes de l'activité β globale sur filtre Spectrométrie γ, si valeurs > 2 mBq/m³ 1 spectrométrie γ mensuelle sur regroupement des filtres quotidiens d'une même station 1 prélèvement en continu sous les vents dominants avec mesure hebdomadaire du tritium atmosphérique 	
Eau de pluie	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement en continu sous les vents dominants avec mesure bimensuelle de l'activité β globale et du tritium 	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement mensuel : HTO
Milieu récepteur des rejets liquides	<ul style="list-style-type: none"> Aliquote horaire prélevée à mi-rejet : activité β globale, potassium et tritium sur eau filtrée + activité β globale sur MES Mesure tritium sur aliquote journalière + spectrométrie γ si tritium > 140 Bq/L (en cas de rejet en cours) ou > 100 Bq/L hors période de rejet 	<ul style="list-style-type: none"> 2 prélèvements hebdomadaires : HTO et ¹⁴C
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement annuel des couches superficielles des terres : spectrométrie γ 	
Végétaux	<ul style="list-style-type: none"> 2 échantillons mensuels d'herbe (dont 1 sous les vents dominants) : spectrométrie γ 1 échantillon annuel d'herbe (HTO et TOL) 	
Lait	<ul style="list-style-type: none"> 2 échantillons mensuels de lait (dont 1 sous les vents dominants) : spectrométrie γ mensuelle 2 échantillons trimestriels (HTO) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 échantillon deux fois par an : spectrométrie γ, HTO, TOL et ¹⁴C
Productions agricoles	<ul style="list-style-type: none"> 3 prélèvements annuels des principales productions agricoles : spectrométrie γ, 2 HTO, 2 TOL 	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement annuel de céréales : spectrométrie γ 1 prélèvement annuel de légumes feuilles : spectrométrie γ, HTO, TOL et ¹⁴C
Flore aquatique	<ul style="list-style-type: none"> 2 échantillons annuels (amont/aval) : spectrométrie γ 	
Faune aquatique	<ul style="list-style-type: none"> 2 échantillons annuels (amont/aval) : spectrométrie γ + TOL 	
Sédiments	<ul style="list-style-type: none"> 2 échantillons annuels (amont/aval) : spectrométrie γ 	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement annuel : spectrométrie γ

TABLEAU 2B / PLAN DU SUIVI RADIOÉCOLOGIQUE ANNUEL RÉALISÉ PAR L'IRSN À LA DEMANDE D'EDF AUTOUR DU SITE DE CREYS-MALVILLE (les chiffres représentent le nombre annuel d'analyses)

Matrice	Gamma	HTO	TOL	¹³¹ I	¹⁴ C	⁶³ Ni
Sol		1	1			
Herbe	1					
Lait	1		1			
Feuille de chênes		2	2		2	
Phanérogames aquatiques		2	2	2	2	2
Poissons		1			2	

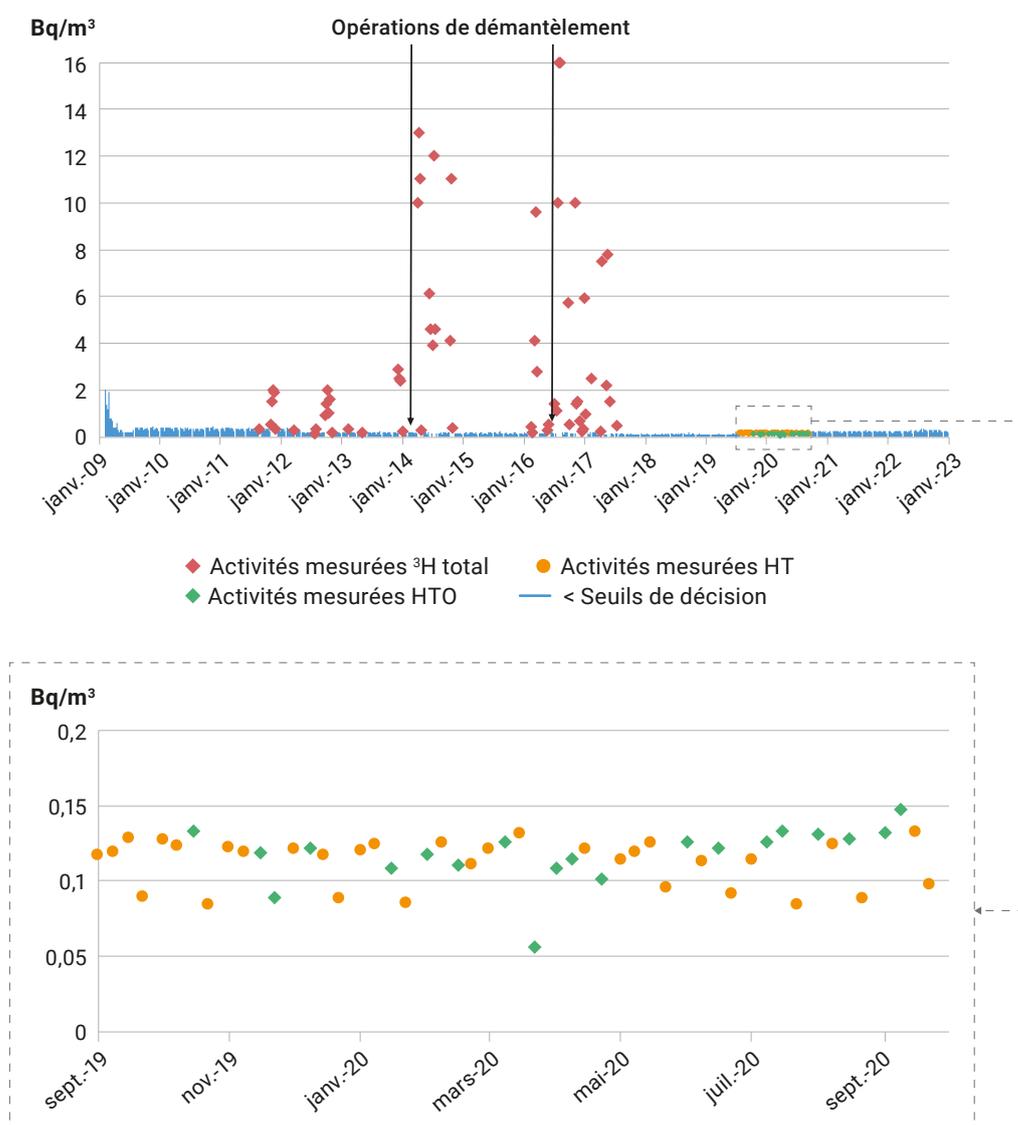
Influence du site de Creys-Malville sur son environnement et doses associées

Le débit de dose gamma à la clôture du site est compris entre 64 à 97 nSv/h (données EDF) sans distinction selon la position de l'appareil de mesure. Il est proche des débits de dose mesurés par l'IRSN et EDF à distance du site (de 64 à 109 nSv/h).

Dans l'air, les principales formes du tritium sont la vapeur d'eau tritiée (HTO) qui est la forme la plus abondante, l'hydrogène tritié (HT) et le méthane tritié (CH₃T).

La figure 3 présente les activités de tritium total de HT et de HTO mesurées dans l'air par EDF depuis 2009. Les analyses de HT et de HTO sont liées à un changement temporaire de méthodologie d'EDF entre septembre 2019 et octobre 2020. Il apparaît depuis 2018 et l'arrêt des opérations de démantèlement qui génèrent des « bouffées » de rejets atmosphériques de tritium (principalement sous sa forme HT) que les activités mesurées sont majoritairement inférieures aux seuils de décision ou proches du bruit de fond (0,008 Bq/m³ dans l'air).

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DE TRITIUM TOTAL, D'HYDROGÈNE TRITIÉ (HT) ET DE VAPEUR D'EAU TRITIÉE (HTO) DANS L'AIR AUTOUR DU SITE DE CREYS-MALVILLE DE 2009 À 2023 (Bq/m³)

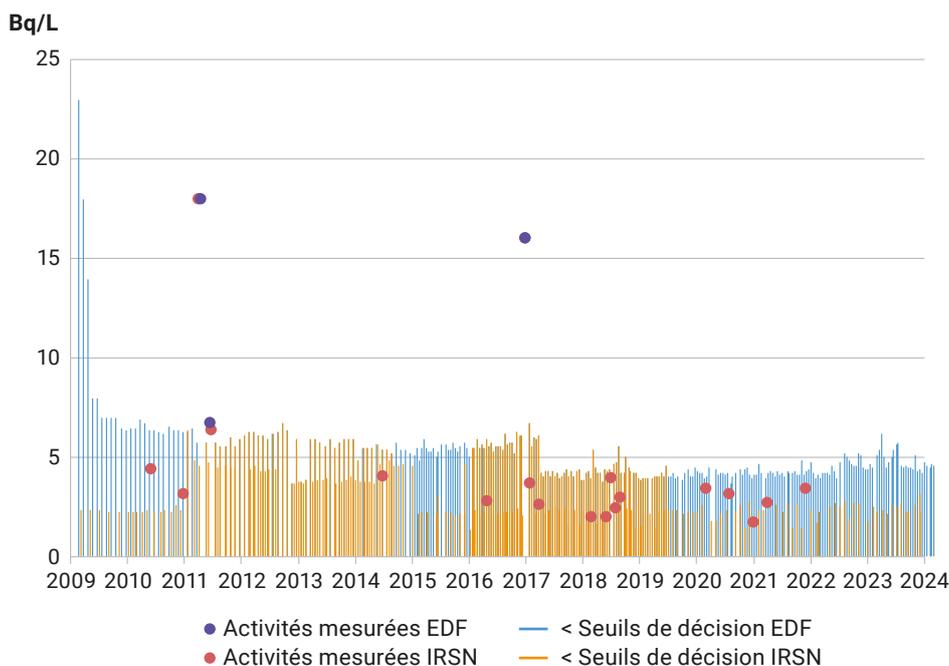


La figure 4 présente les activités de tritium mesurées dans l'eau de pluie, par EDF et l'IRSN, sur le site de Creys-Malville depuis 2009. Les résultats de mesures d'EDF entre 2021 et 2023 sont tous inférieurs aux seuils de décision. Les mesures réalisées par l'IRSN permettent de disposer de quelques valeurs significatives. Comme pour la période précédente (2018-2020), entre 2021 et 2023 les activités mesurées, par l'IRSN, de 1,7 à 3,4 Bq/L sont inférieures aux seuils de décision d'EDF (4 à 7 Bq/L) et sont supérieures au bruit de fond actuel qui est de l'ordre de 0,8 Bq/L d'eau dans une gamme allant de 0,3 à 1,8 Bq/L.

Les seuils de décision des analyses de tritium dans l'air et dans l'eau de pluie réalisées par EDF, qui répondent aux objectifs réglementaires, ne permettent pas de distinguer d'activités ajoutées par des rejets tritiés des installations de Creys-Malville par rapport aux activités liées au bruit de fond radiologique de tritium dans l'environnement hors influence d'installation.

L'influence des rejets de tritium par le site de Creys-Malville est peu visible au travers des mesures effectuées dans le cadre de la surveillance du compartiment terrestre (figure 5A). Les activités moyennes de tritium⁽¹⁾ entre 2021 et 2023 dans l'herbe ($\leq 0,13$ à $0,24$ Bq/kg frais soit $\leq 0,8$ à $1,6$ Bq/L_{ec}), les légumes ($0,09$ à $1,48$ Bq/kg frais soit $2,48$ à $2,47$ Bq/L_{ec}), les céréales ($0,53$ à $0,55$ Bq/kg frais soit $1,4$ à $1,7$ Bq/L_{ec}) et le lait ($0,091$ à $0,31$ Bq/L de lait soit 1 à $3,1$ Bq/L_{ec}) s'inscrivent pour l'essentiel dans la gamme du bruit de fond du tritium environnemental (entre 0,3 et 1,8 Bq/L_{ec} entre 2021 et 2023) et sont majoritairement plus faibles que celles observées dans le précédent bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2018 à 2020 ($0,99$ Bq/kg frais pour l'herbe, $1,19$ Bq/kg frais pour les légumes, $1,11$ Bq/kg frais pour les céréales et $1,04$ Bq/kg frais pour le lait). Pour les 3 dernières années, le marquage observé dans les denrées se limite à un seul échantillon de lait prélevé en 2022 ($0,31$ Bq/L de lait soit $3,1$ Bq/L_{ec}). Il faut remonter à l'époque des opérations de démantèlement de 2016-2017 pour observer un marquage dans le lait autour du site. L'origine de ce tritium est très probablement à rechercher dans l'alimentation du bétail, possiblement exogène à la région.

FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE AUTOUR DU SITE DE CREYS-MALVILLE DE 2009 À 2023 (Bq/L)



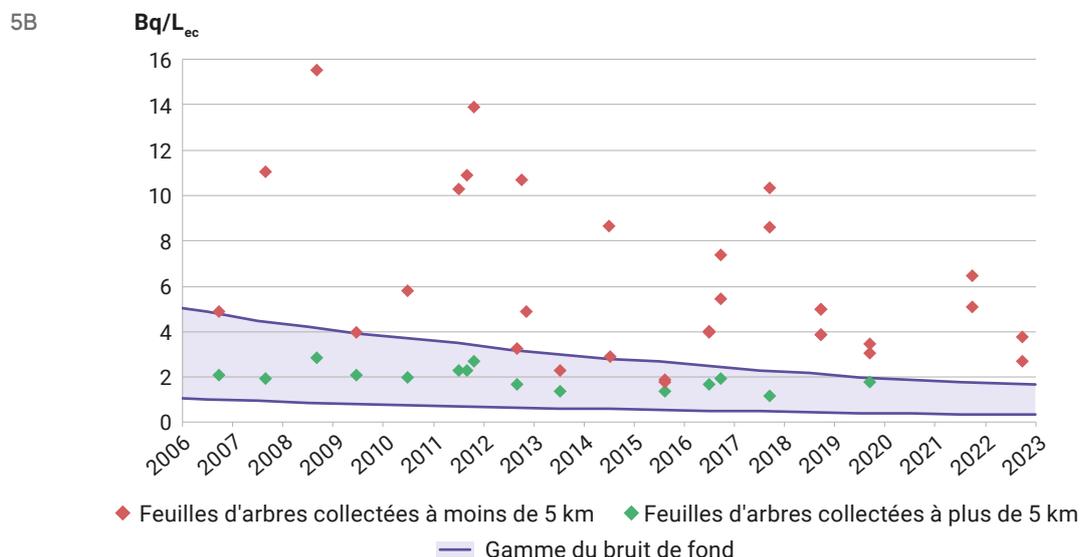
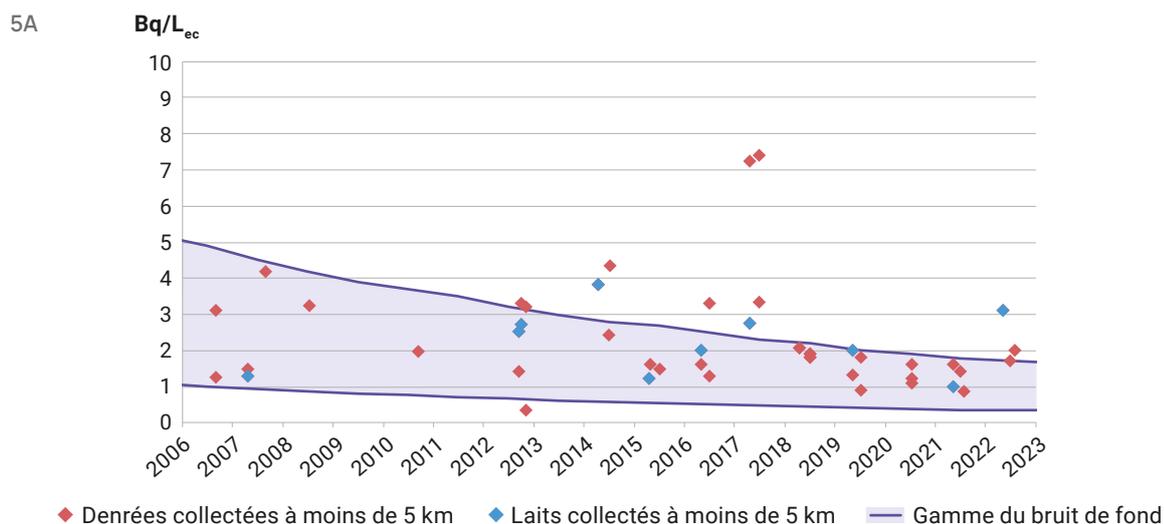
(1) Les résultats des mesures de tritium prescrites dans la réglementation sont exprimés en Bq/kg frais. C'est cette expression que l'on retrouve sur le site du RNM. Les résultats exprimés en Bq/L d'eau de combustion (Bq/L_{ec}) exploités dans ce document relèvent de l'expertise.

L'influence des rejets atmosphériques de tritium du site de Creys-Malville est exclusivement visible dans les activités des feuilles d'arbres prélevées à moins de 5 km du site (figure 5B, 5,1 à 6,5 Bq/L). Elles sont issues de la rémanence des rejets passés du site. En effet, le tritium rejeté par l'installation est essentiellement du gaz hydrogène HT. Contrairement au tritium sous forme de vapeur d'eau HTO, les autres formes, en particulier HT, ne sont pas directement incorporables dans les tissus végétaux. Le tritium sous forme de gaz hydrogène HT est dispersé dans l'atmosphère ou se dépose au sol. Sous l'effet de transformations microbiennes il se transforme,

avec un délai (par rapport à une assimilation directe de HTO), en vapeur d'eau tritiée dans la couche superficielle du sol. La vapeur d'eau tritiée est alors ré-émise vers l'atmosphère ou échangée avec l'eau du sol. L'oxydation de HT rejeté par l'installation, est particulièrement importante dans la litière des sols forestiers, aussi elle n'est pas mise en évidence pour les denrées agricoles produites sur sols cultivés.

Les activités des autres prélèvements réalisés dans l'environnement terrestre du site de Creys-Malville se situent dans la gamme du bruit de fond radiologique (chapitre 1).

FIGURE 5 / ACTIVITÉS DE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ DANS LES FEUILLES D'ARBRES, L'HERBE, LES CÉRÉALES, LE LAIT ET LES FRUITS (Bq/L d'eau de combustion)



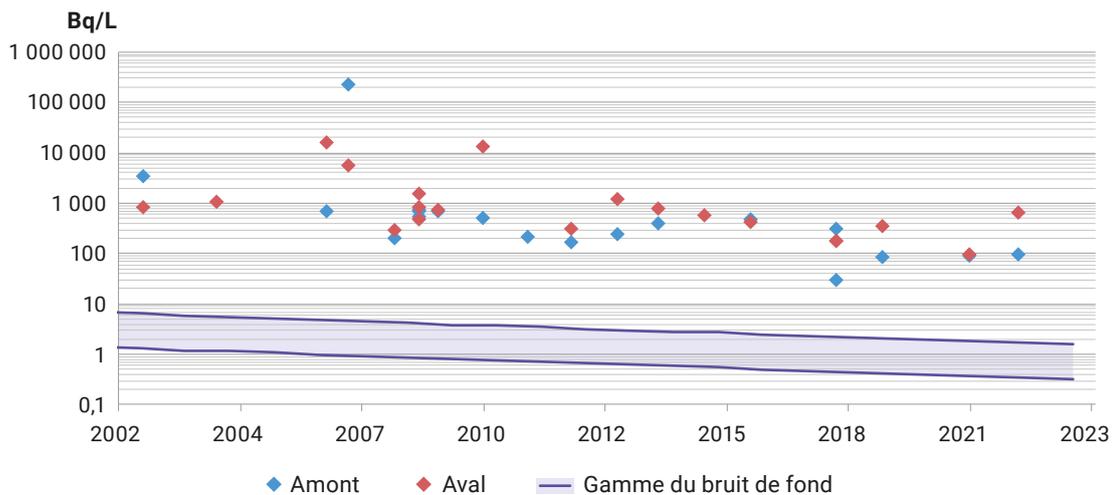
Les activités de tritium dans l'eau du Rhône prélevée en aval du site de Creys-Malville, entre 2020 et 2023, sont toutes inférieures aux seuils de décision (entre 0,5 et 2 Bq/L). Ces seuils de décision, qui répondent aux objectifs réglementaires, ne permettent pas de distinguer d'activités ajoutées par des rejets tritiés des installations de Creys-Malville par rapport aux activités liées au bruit de fond radiologique de tritium dans l'environnement hors influence d'installation.

Les études radioécologiques réalisées de 2021 à 2023 dans l'environnement aquatique en amont et en aval du site de Creys-Malville montrent un marquage

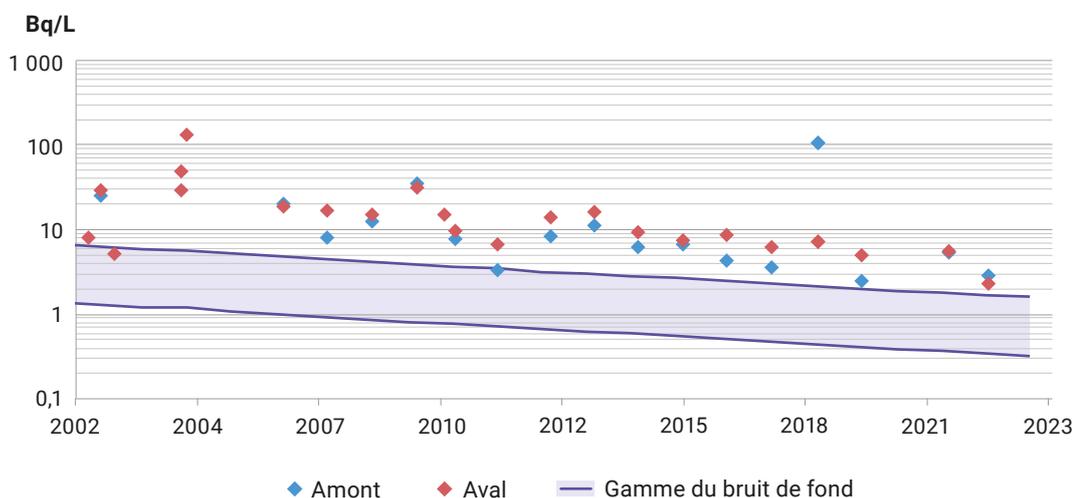
en tritium par les rejets de l'industrie horlogère, en particulier dans les sédiments et les végétaux aquatiques ; les activités en amont dépassent le bruit de fond (figure 6). Les rejets liquides tritiés du site ne renforcent pas significativement ce marquage en aval de Creys-Malville. Les activités des poissons collectés en aval entre 2021 et 2023 (0,38 à 0,44 Bq/kg frais soit de 2,6 à 2,9 Bq/L_{ec}) sont très proches de celles quantifiées en amont (0,29 à 0,35 Bq/kg frais soit de 2,1 à 2,6 Bq/L_{ec}). Dans les végétaux, il apparaît que l'influence des rejets du site est moins marquée pour ces trois dernières années par rapport aux périodes d'observation précédentes.

FIGURE 6 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ DE TOL DANS LES SÉDIMENTS ET VÉGÉTAUX DU RHÔNE EN AMONT ET EN AVA DU SITE DE CREYS-MALVILLE (Bq/L)

6A - Sédiments



6B - Végétaux

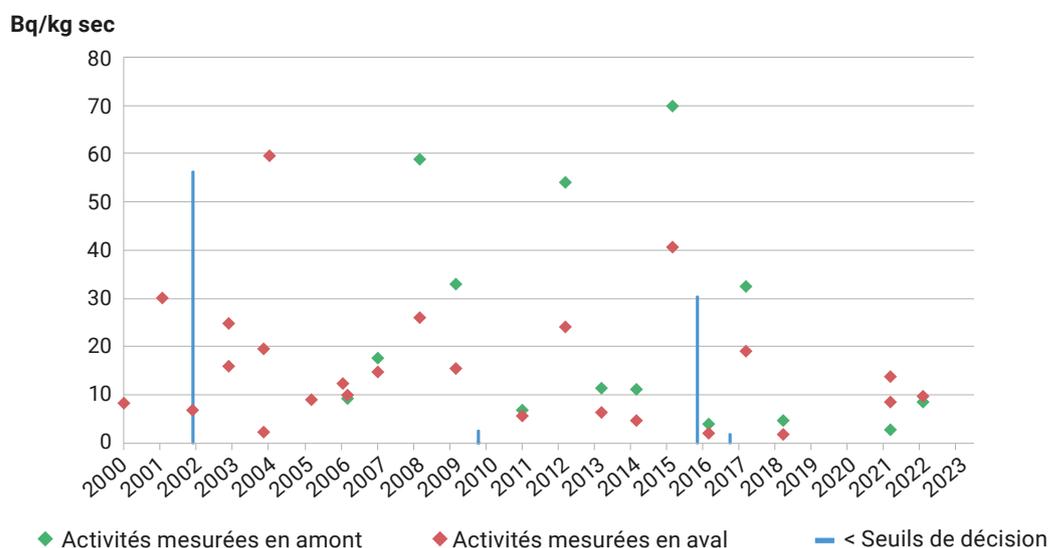


Les services de radiothérapie occasionnent régulièrement un net marquage d'iode-131 en amont et en aval du site (figure 7). La présence d'iode n'est due qu'aux rejets hospitaliers étant donné que le site de Creys-Malville ne rejette plus ce radionucléide.

Les activités de tritium dans l'air étant en dessous des seuils de décision et celles des denrées agricoles, dans la gamme du bruit de fond, il n'est pas possible d'évaluer l'exposition de la population riveraine du site de Creys-Malville sur la base de résultats de mesure.

Les résultats des autres analyses réalisées dans l'environnement du site de Creys-Malville se situent dans la gamme du bruit de fond (chapitre 1).

FIGURE 7 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ D'IODE-131 DANS LES VÉGÉTAUX DU RHÔNE EN AMONT ET EN AVAL DU SITE DE CREYS-MALVILLE (Bq/kg sec)



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 autorisés étaient composés principalement de tritium, aussi bien dans les effluents liquides que dans les effluents rejetés dans l'atmosphère. Après l'arrêt de l'installation, la génération d'effluents tritiés a perduré, mais avec des activités moindres et exclusivement rejetées dans l'atmosphère. Pour les effluents liquides, le rejet dans l'Ellez a eu lieu jusqu'en 1992 ; postérieurement à cette date, les rejets ont cessé. Les rares effluents liquides, produits dans le cadre de l'exploitation et du démantèlement du site, sont désormais expédiés à l'extérieur du site pour traitement. Conformément à la réglementation, le site des Monts d'Arrée dispose aujourd'hui d'une autorisation spécifique pour rejeter

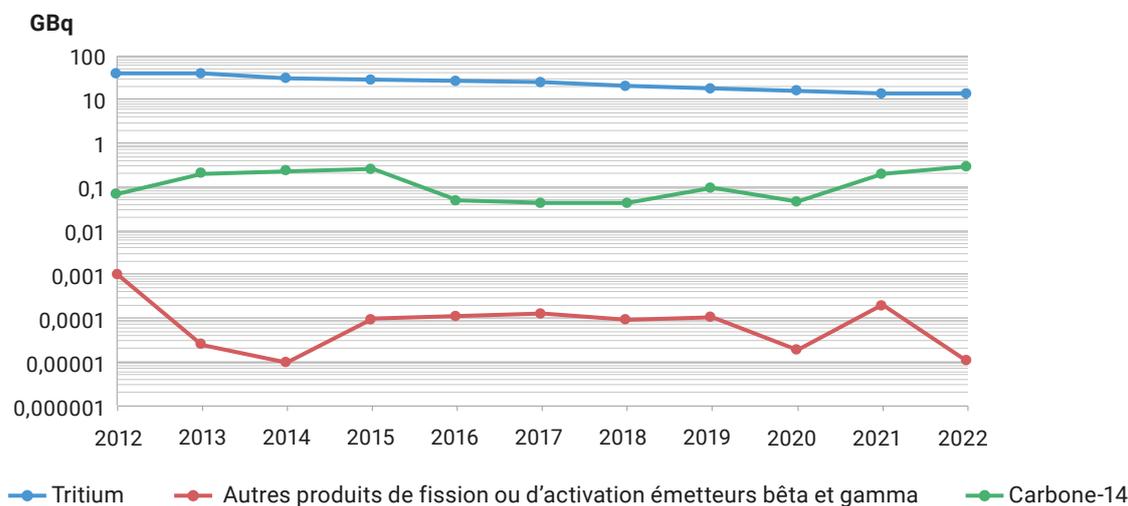
des substances radioactives, uniquement dans l'atmosphère. Les rejets radioactifs proviennent de la ventilation des bâtiments. Le tritium constitue la majeure partie des activités rejetées. Le tableau 1 présente les activités rejetées de 2017 à 2022. Les fluctuations d'activités rejetées sont liées aux opérations de démantèlement. Une baisse très significative des rejets de tritium est observée sur les vingt dernières années (figure 1). Les rejets annuels de carbone-14 et des autres produits de fission et d'activation sont stables mais très nettement plus faibles.

Les obligations réglementaires relatives à la surveillance de l'environnement sont fixées de manière générale par la décision n° 2013-DC-0360 de l'ASN du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base, modifiée par la décision n° 2016-DC-0569 du 29 septembre 2016. Ces obligations réglementaires sont déclinées localement dans les décisions ASN n° 2011-DC-0239 et n° 2011-DC-0240 du 1^{er} septembre 2011 portant respectivement sur les limites de rejets dans l'environnement des effluents et les modalités de prélèvements d'eau et de rejets dans l'environnement des effluents de l'installation nucléaire de base n° 162 exploitée par Électricité de France (EDF SA) sur la commune de Loqueffret (département du Finistère).

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS REJETÉES DANS L'ATMOSPHÈRE PAR L'INSTALLATION DE BRENNILIS POUR LA PÉRIODE DE 2017 À 2022

Bilan des rejets atmosphériques (GBq/an)			
Activités rejetées	Tritium	Autres produits de fission ou d'activation émetteurs bêta et gamma	Carbone-14
2017	24,4	0,00013	0,043
2018	21,0	0,000092	0,044
2019	17,5	0,000106	0,097
2020	15,9	0,0000187	0,0466
2021	13,5	0,000207	0,205
2022	13,6	0,0000105	0,294

FIGURE 1 / ACTIVITÉS REJETÉES DANS L'ATMOSPHÈRE PAR L'INSTALLATION DE BRENNILIS
 POUR LA PÉRIODE DE 2012 À 2022 (GBq/an)

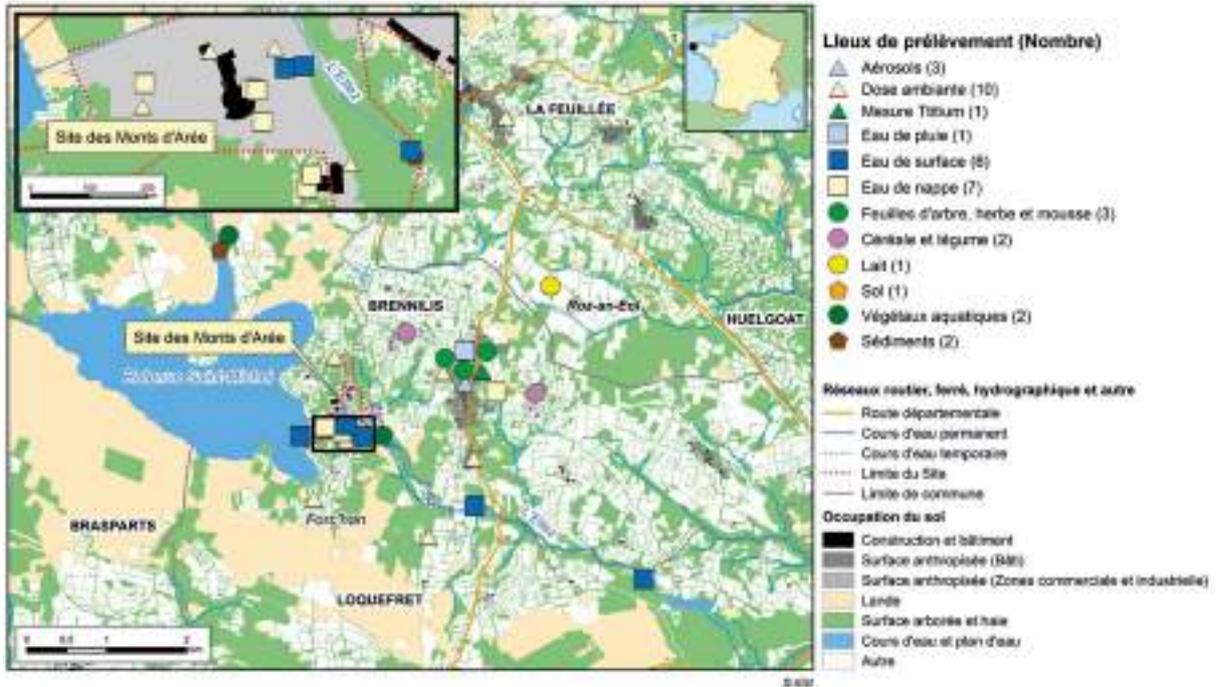


La figure 2 et le tableau 2-A présentent le programme de surveillance de l'environnement du site de Brennilis réalisé par l'exploitant qui utilise des performances métrologiques cohérentes avec l'objectif de sa surveillance réglementaire. Cette surveillance permet de s'assurer d'une part du respect des limites fixées dans les décisions en vigueur et d'autre part du bon fonctionnement des installations.

Des études radioécologiques annuelles confiées par EDF à l'IRSN de 2002 à 2017 puis à SUBATECH depuis 2018, viennent compléter les mesures réglementaires (tableau 2-B). Ces études radioécologiques utilisent des techniques métrologiques performantes afin de caractériser sur le long terme l'évolution de la radioactivité mesurée dans les compartiments terrestres et aquatiques proches du site de Brennilis. La surveillance effectuée est identique à celle d'un CNPE à l'exception de l'absence d'hydrocollecteur en cohérence avec l'absence d'autorisation de rejets d'effluents liquides radioactifs.

L'IRSN réalise également une surveillance de l'environnement du site, complémentaire à celle de l'exploitant, son programme est détaillé dans le tableau 2-A.

FIGURE 2 / CARTE DE LOCALISATION DES PRÉLÈVEMENTS DU PLAN DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE BRENNILIS



Le site de Brennilis

**TABLEAU 2A / PLAN DE LA SURVEILLANCE RÉALISÉE PAR EDF ET L'IRSN
DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE BRENNILIS**

Milieu surveillé ou nature du contrôle	EDF	IRSN
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> • 4 dosimètres en bordure de site • 5 dosimètres dans un rayon de 1 km • 1 dosimètre dans un rayon de 5 km • 1 balise γ dans un rayon de 1 km 	
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> • 3 points de prélèvement et mesures quotidiennes de : <ul style="list-style-type: none"> - l'activité β globale sur filtre - spectrométrie γ si valeurs $> 2 \text{ mBq/m}^3$ • 1 spectrométrie γ mensuelle sur regroupement des filtres quotidiens d'une même station • 1 prélèvement en continu sous les vents dominants avec mesure hebdomadaire du tritium atmosphérique 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 point de prélèvement et mesures hebdomadaires de spectrométrie γ
Eau de pluie	<ul style="list-style-type: none"> • 1 prélèvement en continu sous les vents dominants avec mesure bimensuelle de l'activité β globale et du tritium 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 point de prélèvement : tritium
Sol	<ul style="list-style-type: none"> • 1 prélèvement annuel des couches superficielles des terres : spectrométrie γ 	
Végétaux	<ul style="list-style-type: none"> • 2 échantillons mensuels d'herbe (dont 1 sous les vents dominants) : spectrométrie γ trimestrielle et du tritium + ^{14}C, HTO et TOL annuel 	
Lait	<ul style="list-style-type: none"> • 1 échantillon trimestriel de lait (sous les vents dominants) : mesures spectrométrie γ et du tritium (HTO et TOL) + ^{14}C annuel 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 échantillon semestriel de lait : mesures spectrométrie γ et du tritium (HTO)
Productions agricoles	<ul style="list-style-type: none"> • 1 prélèvement annuel des principales productions agricoles : spectrométrie γ, ^{14}C, HTO et TOL 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 prélèvement annuel de céréales : spectrométrie γ • 1 prélèvement annuel de légumes racines : spectrométrie γ, ^{14}C, HTO et TOL
Eaux de surface	<ul style="list-style-type: none"> • 2 prélèvements bimensuels (milieu récepteur aval) Forchan et Ellez aval : β global, K et ^3H sur l'eau filtrée + β global sur MES • 1 prélèvement mensuel en amont du lac de Saint-Herbot : β global, K et ^3H sur l'eau filtrée + β global sur MES • 1 prélèvement mensuel dans le lac de Saint-Michel : β global, K et ^3H sur l'eau filtrée + spectrométrie γ • 1 prélèvement mensuel en amont rejet SEO principal : β global, K et ^3H sur l'eau filtrée + β global sur MES • 1 prélèvement mensuel au niveau du lieu de rejet des eaux pluviales : β global sur MES 	
Flore aquatique	<ul style="list-style-type: none"> • 2 échantillons annuels (amont/aval) : spectrométrie γ 	
Faune aquatique	<ul style="list-style-type: none"> • 2 échantillons quinquennaux (amont/aval) : spectrométrie γ + TOL + ^{14}C 	
Sédiments	<ul style="list-style-type: none"> • 2 échantillons annuels (amont/aval) : spectrométrie γ 	

**TABLEAU 2B / PLAN DU SUIVI RADIOÉCOLOGIQUE ANNUEL COMPLÉMENTAIRE
AUTOUR DU SITE DE BRENNILIS DEPUIS 2018, RÉALISÉ PAR SUBATECH À LA DEMANDE D'EDF
(les chiffres présentent le nombre annuel d'analyses)**

Matrice	Spectrométrie γ	HTO	TOL	^{14}C	^{90}Sr	^{63}Ni	^{36}Cl	Spectrométrie α
Sol de prairie					1		1	
Herbe	1				1		1	
Feuilles d'arbres		1	1	1				
Lait	1		1					
Sédiment			2	2		2		2
Phanérogames aquatiques			2	2				

Influence de la centrale de Brennilis sur son environnement

L'absence de rejets liquides ainsi que les faibles activités rejetées dans l'atmosphère expliquent que les résultats de mesure de la surveillance environnementale du tritium autour du site dans l'air, l'eau de pluie, l'Ellez et le réservoir Saint-Michel sont tous inférieurs aux seuils de décision ($SD < 5 \text{ Bq/L}$). Cependant, les seuils de décision, qui répondent aux objectifs réglementaires, ne permettent pas de distinguer des activités ajoutées par les rejets tritiés des installations de Brennilis par rapport aux activités liées au bruit de fond radiologique de tritium dans l'environnement hors influence d'installation.

Dans le cadre du suivi environnemental complémentaire, les mesures par spectrométrie gamma et alpha réalisées sur les différents échantillons (terrestre et aquatique) montrent des niveaux de radioactivité qui peuvent être plus élevés que la moyenne française mais qui relèvent soit de la radioactivité naturelle (radionucléides des chaînes naturelles de l'uranium), soit de la rémanence des retombées des essais d'armes nucléaires (^{137}Cs et isotopes du plutonium), dans une moindre mesure de l'accident de Tchernobyl. La géologie locale (roches granitiques et grès quartzite) ainsi que la pluviométrie élevée du site peuvent expliquer ces résultats.

Dans le compartiment terrestre, les activités de tritium et de carbone-14 correspondent, pour l'essentiel, aux activités en dehors de toute influence industrielle. En 2018, l'activité de tritium dans le lait a exceptionnellement dépassé la gamme du bruit de fond.

Dans le compartiment aquatique, les études menées en 2002 et 2008 ainsi que les suivis radioécologiques annuels réalisés de 2012 à 2017 ont toujours mis en évidence un marquage en carbone-14 et en tritium organiquement lié dans les sédiments, illustrant la rémanence des rejets liquides anciens du site. Ces marquages sont en diminution car le site ne rejette plus d'effluents liquides depuis 1992. EDF a mené deux campagnes de mesures dans les chairs de poissons (2013 et 2018). Les poissons collectés en 2018 en aval du site étaient encore marqués par du carbone-14 (figure 3). Les activités de tritium dans les phanérogames collectées en aval du site, en 2021, étaient supérieures au bruit de fond (figure 4). Ces éléments montrent que la source secondaire de tritium et de carbone-14 dans les sédiments peut, ponctuellement, marquer les végétaux aquatiques et les poissons.

Les résultats sur le végétal en amont et le sédiment en aval de 2018 respectivement anormalement élevés et faibles ne sont pas expliqués.

Aucun évènement récent ayant entraîné des conséquences pour l'environnement n'est recensé.

Les activités dans les productions agricoles et les eaux de boisson sont du même ordre de grandeur que celles hors influence de toutes installations, il n'est pas possible d'évaluer la dose par ingestion de denrées locales imputable au site. Par ailleurs, les activités de tritium dans l'air sont inférieures aux seuils de décision. Il n'est ainsi pas possible de calculer une dose par inhalation et incorporation transcutanée.

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DE CARBONE-14 DANS LES SÉDIMENTS ET LES POISSONS COLLECTÉS EN AMONT ET EN AVAL DU SITE DE BRENNILIS DE 2012 À 2021 (Bq/kg de carbone)

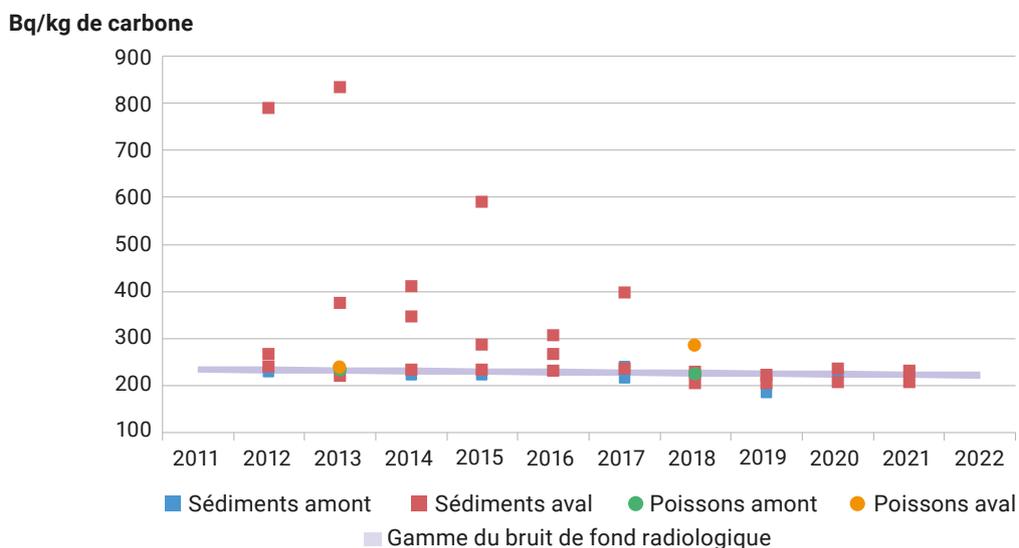
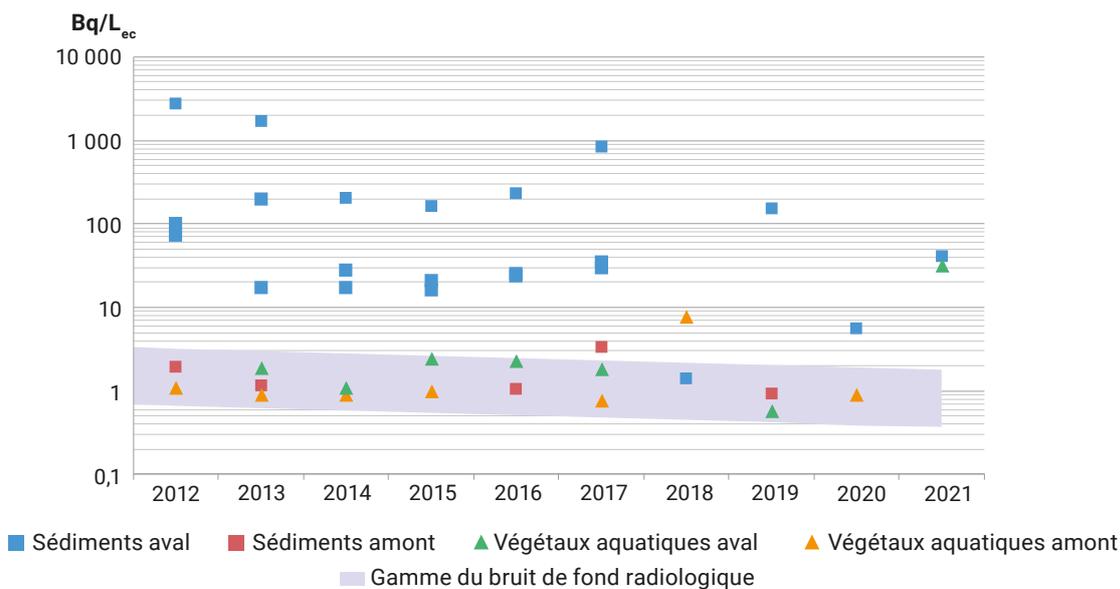


FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ DANS LES SÉDIMENTS ET LES VÉGÉTAUX AQUATIQUES EN AMONT ET EN AVAL DU SITE DE BRENNILIS DE 2012 À 2021 (Bq/L d'eau de combustion)



Le site de Fessenheim

Le site de Fessenheim, implanté à l'est du département du Haut-Rhin, est situé sur la rive française du grand canal d'Alsace, sur le territoire de la commune de Fessenheim à 30 kilomètres au nord-est de Mulhouse.

Les deux réacteurs du CNPE de Fessenheim, d'une puissance de 900 MWe chacun, ont été exploités de 1977 à 2020. Ils ont été définitivement mis à l'arrêt les 22 février (réacteur n° 1) et 30 juin 2020 (réacteur n° 2), depuis, le site est entré dans une phase dite de prédémantèlement. En décembre 2020, un dossier de démantèlement a été transmis à l'ASN pour instruction pour un décret prévu en 2026. Ce décret s'appuiera notamment sur l'enquête publique qui s'est déroulée du 25 mars au 30 avril 2024 et une consultation de l'Autorité environnementale et l'avis de l'ASN.

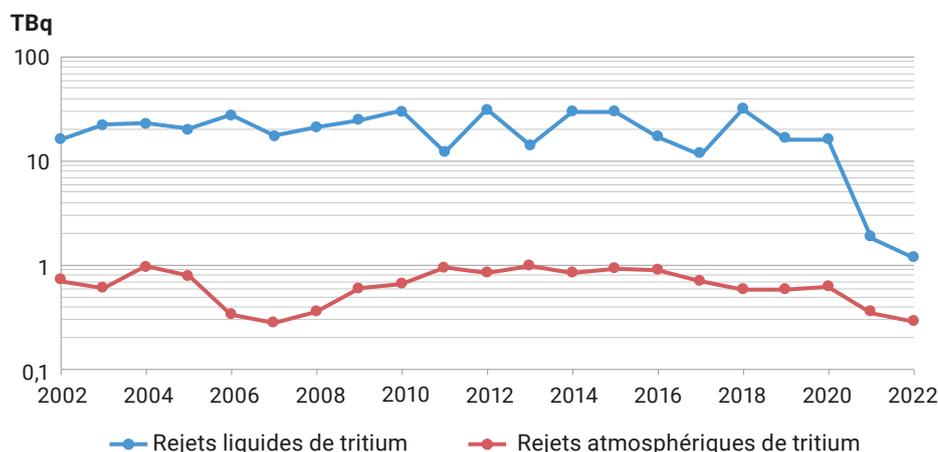
Rejets et surveillance de l'environnement

Conformément à la réglementation, le site de Fessenheim dispose d'une autorisation spécifique pour rejeter des substances radioactives dans l'environnement. Les rejets d'effluents radioactifs liquides proviennent du fonctionnement des installations du circuit primaire et des circuits annexes de l'îlot nucléaire. Les rejets d'effluents radioactifs atmosphériques proviennent eux de la ventilation des locaux nucléaires et du dégazage du circuit primaire. Le tritium constitue l'essentiel des activités rejetées : de 75 à 99 % des rejets liquides et atmosphériques. Le tableau 1 présente les activités rejetées pour la période de 2017 à 2022 et la figure 1 présente l'évolution des rejets atmosphériques et liquides de tritium de 2002 à 2022. Il apparaît depuis 2020, et la mise à l'arrêt des installations, que les activités de tritium rejetées par voies liquide et atmosphérique diminuent sensiblement pour atteindre 1,17 TBq et 286 GBq en 2022 respectivement. Des rejets subsisteront pendant la déconstruction du site. Les décisions de l'ASN encadrant les rejets et prélèvements du site seront mises à jour pour tenir compte de l'évolution de la nature des rejets pendant le démantèlement.

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS REJETÉES PAR LES INSTALLATIONS DE FESSENHEIM POUR LA PÉRIODE DE 2017 À 2022

	Unité	Activité rejetée					
		2017	2018	2019	2020	2021	2022
Rejets radioactifs liquides							
Tritium	TBq	11,6	31,2	16,118	16,002	1,84	1,17
Carbone-14	GBq	4,02	12,2	8,3	4,68	0,29	0,158
Iodes	GBq	0,002	0,0048	0,00651	0,0065	0,0025	0,0039
Autres produits de fission ou d'activation	GBq	0,3	0,404	0,535	0,48	0,170	0,219
Rejets radioactifs atmosphériques							
Gaz rares (⁸⁵ Kr)	TBq	0,773	0,113	0,177	0,119	0,091	0,105
Tritium	GBq	715	588	589	617	349	286
Carbone-14	GBq	117	175	346	343	34,6	21,9
Iodes	GBq	0,01	0,00074	0,0089	0,008	0,0075	0,0071
Autres produits de fission ou d'activation	GBq	0,001	0,00088	0,0024	0,0009	0,00065	0,000784

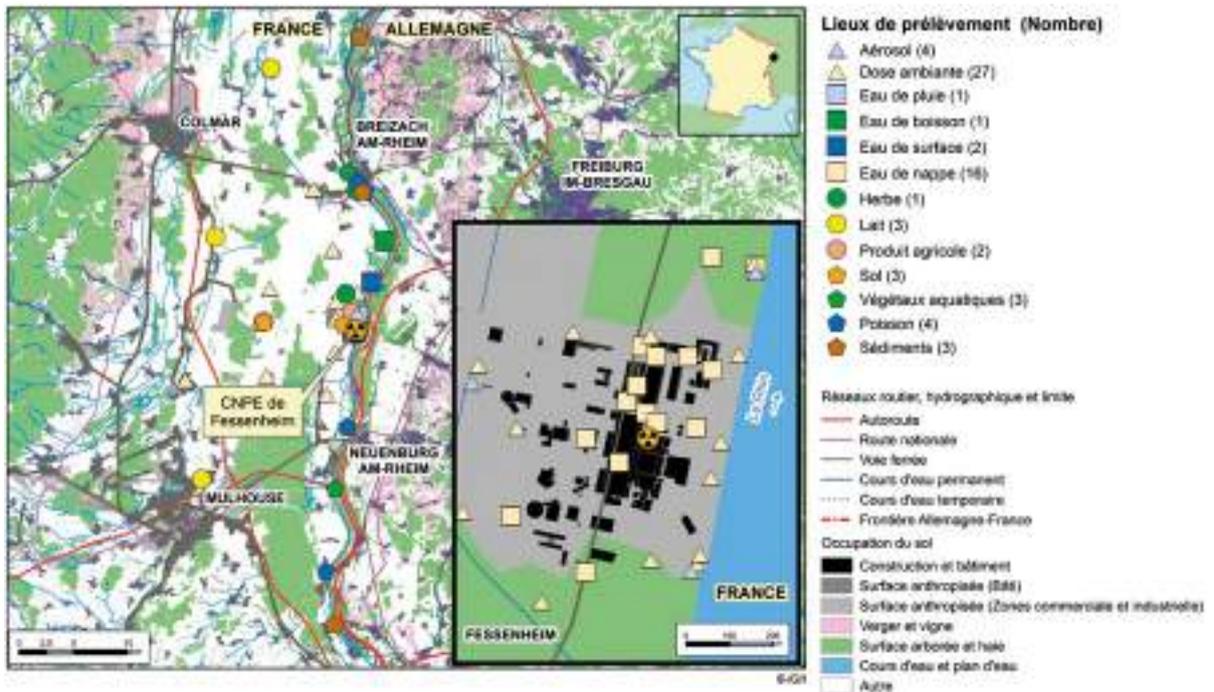
FIGURE 1 / ÉVOLUTION DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES ET LIQUIDES DE TRITIUM DU SITE DE FESSENHEIM DE 2002 A 2022 (TBq/an)



Les obligations réglementaires relatives à la surveillance de l'environnement sont fixées de manière générale par la décision n° 2013-DC-0360 de l'ASN du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base, modifiée par la décision n° 2016-DC-0569 du 29 septembre 2016, ainsi que par la décision n° 2016-DC-0550 de l'ASN du 29 mars 2016 (chapitre 1). La figure 2 et les tableaux 2A et 2B présentent le programme de surveillance de l'environnement du site de Fessenheim réalisé par l'exploitant qui utilise des performances métrologiques cohérentes avec l'objectif de sa surveillance réglementaire. Cette surveillance permet d'une part de s'assurer du respect des limites de rejets autorisées par les décisions en vigueur et du bon fonctionnement

des installations, d'autre part d'observer l'influence éventuelle des rejets sur l'environnement. Des études radioécologiques annuelles confiées par EDF à l'IRSN viennent en complément des mesures réalisées par le site de Fessenheim. Ces études mettent en œuvre des techniques métrologiques d'expertise plus performantes afin de caractériser sur le long terme l'évolution de la radioactivité mesurée dans les compartiments terrestres et aquatiques proches du site de Fessenheim. L'IRSN réalise également une surveillance de l'environnement du site de Fessenheim, complémentaire à celle de l'exploitant, son programme est détaillé dans le tableau 2A. La surveillance de l'environnement du site, évoluera possiblement selon les exigences du décret autorisant le début de la déconstruction du site.

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 FESSENHEIM



Le site de Fessenheim

TABLEAU 2A / PLAN DE LA SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ DE L'ENVIRONNEMENT RÉALISÉE PAR EDF ET L'IRSN DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE FESSENHEIM

Milieu surveillé ou nature du contrôle	EDF	IRSN
Dose ambiante (rayonnement gamma ambiant)	<ul style="list-style-type: none"> 10 balises en limite de site 4 balises à 1 km 3 balises à 5 km 10 balises à 10 km 	<ul style="list-style-type: none"> 10 balises TÉLÉRAY, dont une à proximité du site sous les vents dominants
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement en continu sous les vents dominants avec mesure hebdomadaire du tritium atmosphérique 4 points de prélèvement et mesures quotidiennes de l'activité β globale sur filtre Spectrométrie γ, si valeurs > 2 mBq/m³ 1 spectrométrie γ mensuelle sur regroupement des filtres quotidiens d'une même station 	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement hebdomadaire : spectrométrie γ
Eau de pluie	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement en continu sous les vents dominants avec mesure bimensuelle de l'activité β globale et du tritium 	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement mensuel : HTO
Eau de surface/ Milieu récepteur des rejets liquides	<ul style="list-style-type: none"> Aliquote horaire prélevée à mi-rejet : activité β globale, potassium et tritium sur eau filtrée + activité β globale sur MES Mesure tritium sur aliquote journalière + spectrométrie γ si > 140 Bq/L (en cas de rejet en cours) ou > 100 Bq/L hors période de rejet 	<ul style="list-style-type: none"> 2 prélèvements bimensuels : HTO et ¹⁴C Prélèvement horaire avec aliquote 6 jours : HTO 1 prélèvement mensuel de MES : spectrométrie γ
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 2 prélèvements annuels des couches superficielles des terres cultivées : spectrométrie γ 	
Végétaux	<ul style="list-style-type: none"> 2 échantillons mensuels de végétaux (dont 1 sous les vents dominants) : spectrométrie γ 1 échantillon trimestriel de végétaux sous les vents dominants : ¹⁴C 1 échantillon annuel de végétaux sous les vents dominants : HTO et TOL 	
Lait		<ul style="list-style-type: none"> 1 échantillon deux fois par an : spectrométrie γ et HTO
Productions agricoles	<ul style="list-style-type: none"> 2 prélèvements annuels des principales productions agricoles destinées à la consommation humaine : spectrométrie γ, HTO, TOL et ¹⁴C 	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement annuel de céréales : spectrométrie γ 1 prélèvement annuel de légumes feuilles : spectrométrie γ, HTO, TOL et ¹⁴C
Flore aquatique	<ul style="list-style-type: none"> 2 échantillons annuels (amont/aval) : spectrométrie γ et HTO 	
Faune aquatique	<ul style="list-style-type: none"> 2 échantillons annuels (amont/aval) : spectrométrie γ, HTO, TOL et ¹⁴C 	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement annuel : spectrométrie γ, TOL et ¹⁴C
Sédiments	<ul style="list-style-type: none"> 3 échantillons annuels (amont/aval) : spectrométrie γ 	

TABLEAU 2B / PLAN DU SUIVI RADIOÉCOLOGIQUE ANNUEL COMPLÉMENTAIRE AUTOUR DU SITE DE FESSENHEIM DEPUIS 2018, RÉALISÉ PAR L'IRSN À LA DEMANDE D'EDF (les chiffres représentent le nombre annuel d'analyses)

Matrice	Gamma	HTO	TOL	¹³¹ I	¹⁴ C	⁶³ Ni
Sol de prairie	1					
Herbe	1					
Lait	1	1	1		1	
Eau de boisson			1			
Eau d'irrigation			1			
Phanérogames aquatiques	1		2	2	2	2

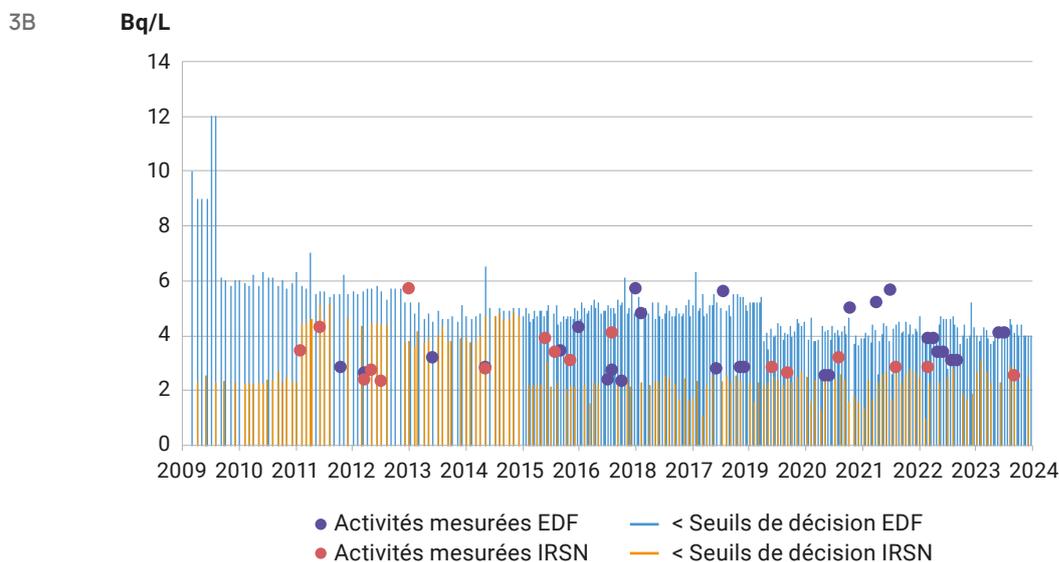
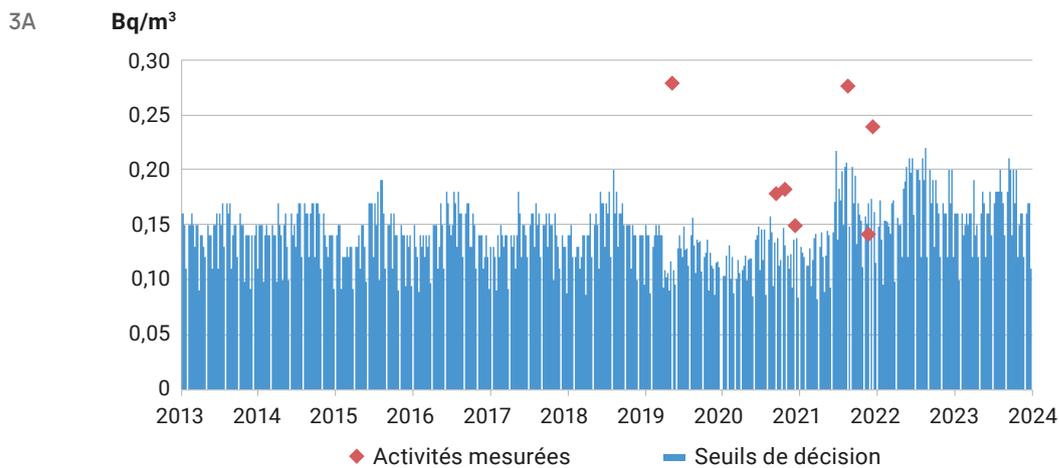
Influence du site de Fessenheim sur son environnement et doses associées

Le débit de dose gamma à la clôture du site est compris entre 83 à 130 nSv/h (données EDF) sans distinction selon la position de l'appareil de mesure. Il est proche des débits de dose mesurés par l'IRSN et EDF à distance du site (de 68 à 145 nSv/h).

Les figures 3A et 3B présentent les activités de tritium dans l'air et dans l'eau de pluie à proximité immédiate du site, depuis 2013 et 2009. Les activités de tritium dans l'air et dans l'eau de pluie sont très majoritairement (98 et 96 % respectivement) inférieures aux seuils de décision de 0,1-0,2 Bq/m³ d'air et 0,4-0,5 Bq/L pour l'eau de pluie. Les quelques activités de tritium mesurées significativement entre 2021 et 2023 dans l'air (0,14 à

0,28 Bq/m³) et dans l'eau de pluie (3,1 à 5,7 Bq/L) sont très proches des seuils de décision habituellement observés. Elles dépassent cependant le bruit de fond actuel moyen qui est de l'ordre de 0,008 Bq/m³ (0,003 à 0,018 Bq/m³) dans l'air et de 0,8 Bq/L (0,3 à 1,8 Bq/L), dans l'eau (à une activité de tritium de 1 Bq/L dans la vapeur d'eau de l'air correspond, dans des conditions théoriques moyennes, une activité de tritium dans l'air de 0,01 Bq/m³ d'air). Les seuils de décision, qui répondent aux objectifs réglementaires d'une surveillance de routine, ne permettent pas de distinguer d'activités ajoutées par des rejets tritiés des installations de Fessenheim par rapport aux activités liées au bruit de fond radiologique de tritium dans l'environnement hors influence d'installation.

FIGURE 3 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM (HTO) DANS L'AIR (3A) ET L'EAU DE PLUIE (3B) AUTOUR DU SITE DE FESSENHEIM



Dans les aérosols atmosphériques collectés par l'IRSN, parmi les produits d'activation ou de fission, seul le césium-137 est sporadiquement quantifié, avec des activités volumiques inférieures aux seuils de décision habituels. Ces activités volumiques sont imputables à la rémanence des retombées anciennes (chapitre 1) et ponctuellement à des épisodes de sables sahariens (chapitre 4).

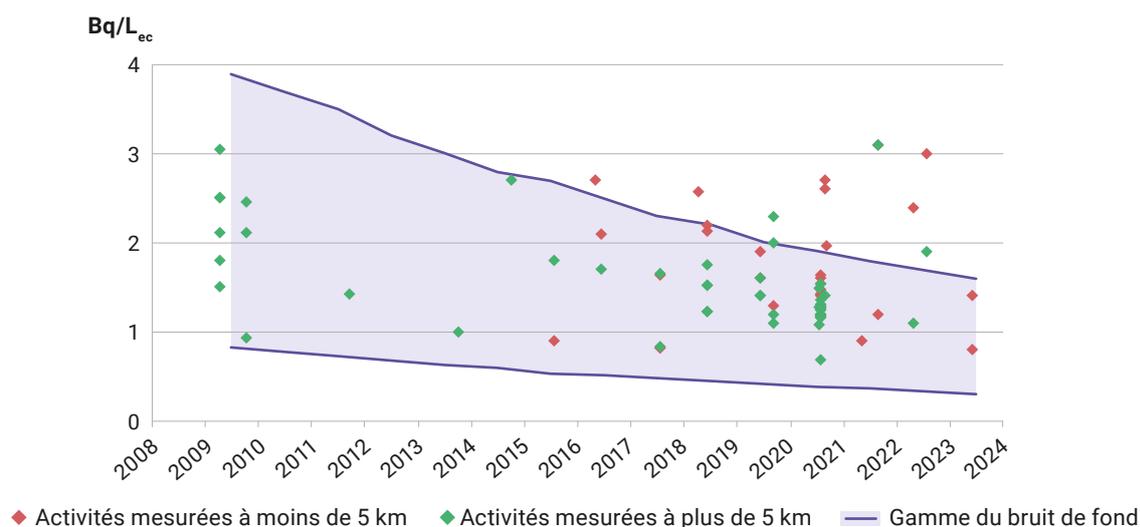
L'influence des rejets atmosphériques tritiés du site de Fessenheim est visible au travers des mesures de tritium effectuées dans le cadre de la surveillance du compartiment terrestre.

Entre 2021 et 2023, les activités massiques de tritium⁽¹⁾ organiquement lié dans l'herbe (0,11 et 0,3 Bq/kg frais soit 0,8 à 2,4 Bq/L_{ec}), les légumes feuilles (0,04 à 0,12 Bq/kg frais soit 1,2 à 3,1 Bq/L_{ec}) et le lait de vache (0,06 et 0,12 Bq/L de lait, soit 0,5 et 1,1 Bq/L_{ec}) sont proches de celles des années précédentes (figure 4). Des activités, parmi les herbes et les légumes collectés à moins de 5 km du site dépassent l'activité moyenne du bruit de fond de 0,8 Bq/L_{ec} (gamme de 0,3 et 1,8 Bq/L_{ec}).

Entre 2021 et 2023, les activités de tritium libre (non lié à la matière organique) dans l'herbe (0,7 et 1,1 Bq/kg frais soit 0,9 et 1,4 Bq/L), les légumes feuilles (0,7 à 1,70 Bq/kg frais soit 0,7 à 1,9 Bq/L) et dans le lait de vache (0,6 à 2,6 Bq/L de lait soit 0,7 à 3,1⁽²⁾ Bq/L) sont faibles et très proches du bruit de fond (entre 0,3 et 1,8 Bq/L entre 2021 et 2023) et dans la continuité des observations des années précédentes.

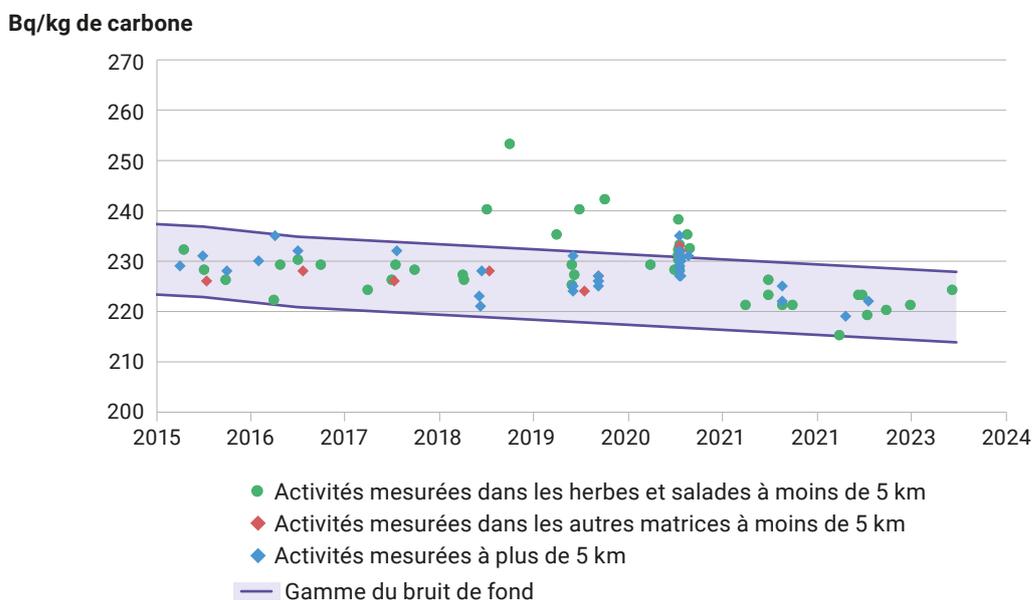
Avant 2021, quelques activités de carbone-14 dans l'herbe (21 à 62 Bq/kg frais soit 235 à 253 Bq/kg de C) et dans les salades (5 Bq/kg frais soit 235 Bq/kg de C) collectées à moins de 5 km sous les vents dominants dépassaient le bruit de fond moyen (figure 5) et signaient l'occurrence d'un marquage par les rejets dans l'atmosphère du site. Pour les autres échantillons, comme les céréales collectées à moins de 5 km, les activités étaient comprises dans la gamme du bruit de fond. Depuis 2021, le marquage par les rejets de carbone-14 dans l'atmosphère n'est plus mis en évidence. Entre 2021 et 2023, les activités dans les salades (de 4,4 à 10,5 Bq/kg frais soit 219 à 222 Bq/kg de C), le lait de vache (13,3 et 15,5 Bq/L soit 219,4 et 225,2 Bq/kg de C) et l'herbe (89,5 à 97,8 Bq/kg sec soit 215 à 223 Bq/kg de C) sont toutes comprises dans la gamme du bruit de fond.

FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE TOL DANS L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE (Bq/L d'eau de combustion)



(1) Les résultats des mesures de tritium prescrites dans la réglementation sont exprimés en Bq/kg frais. C'est cette expression que l'on retrouve sur le site du RNM. Les résultats exprimés en Bq/L d'eau de combustion (Bq/L_{ec}) exploités dans ce document relèvent de l'expertise.
 (2) Forte incertitude sur ce résultat et point de collecte très éloigné d'un site détenant du tritium.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS DE CARBONE-14 DANS L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE (Bq/kg de carbone)



Les activités massiques de césium-137 dans l'environnement terrestre de Fessenheim entre 2021 et 2023 (herbe 0,09 Bq/kg sec, salades 0,006 Bq/kg frais, lait 0,007 Bq/L, et sol 5,5 à 13,1 Bq/kg sec) sont, comme pour les autres radionucléides recherchés, dans la gamme du bruit de fond radiologique (chapitre 1).

Dans l'eau du Rhin prélevée en aval du site de Fessenheim 75 % des activités de tritium sont inférieures aux seuils de décision (figure 6). Elles ont diminué progressivement depuis 2009 pour être aujourd'hui majoritairement inférieures à 10 Bq/L proches des activités mesurées en amont (de 1,6 à 8 Bq/L). Cependant, depuis la mise à l'arrêt des réacteurs du site en juin 2020, elles peuvent atteindre ponctuellement des activités précédemment mesurées de 25 à 40 Bq/L, lors des périodes de rejets dans le Rhin par les installations de Fessenheim.

Les études radioécologiques menées dans l'environnement aquatique en amont du site montrent que les apports par les retombées globales, les rejets de l'industrie horlogère (tritium issu des fabriques de matière lumineuse et des ateliers d'horlogerie) et des installations électronucléaires suisses, ont une influence quantifiable dans le Rhin (sédiments, végétaux et poissons) en amont et en aval de Fessenheim ; les activités de tritium dépassent celles observées hors apport industriel local (figure 7). D'autres radionucléides témoignent de ces influences comme le cobalt-60, qui est quantifié en amont du point de rejet de Fessenheim (figure 8) et l'iode-131, rejetées par les services de radiothérapie suisses et français en amont du site, qui occasionnent un marquage des végétaux aquatiques (figure 9).

Les études radioécologiques réalisées de 2021 à 2023 dans l'environnement aquatique en aval du site de Fessenheim montrent un marquage en carbone-14 des poissons, en césium-137 des sédiments et très ponctuellement de tritium libre et d'argent-110m des végétaux. Un léger marquage de tritium des eaux de boisson ou d'irrigation collectées en aval du site est mis en évidence.

FIGURE 6 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ DE TRITIUM DANS LE RHIN EN AVAL DU SITE DE FESSENHEIM (EDF) (Bq/L)

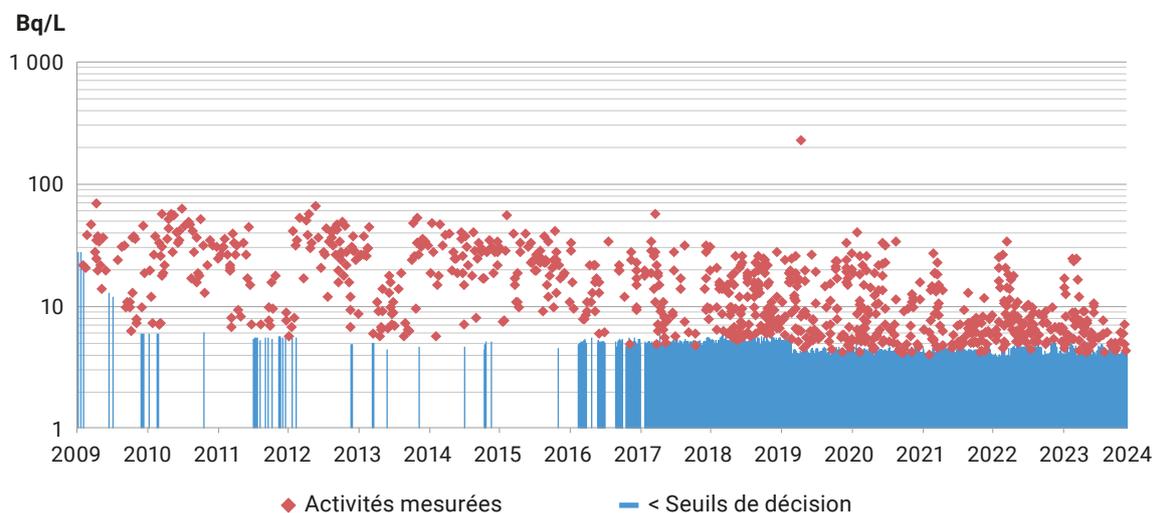


FIGURE 7 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ DE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ DANS LES POISSONS PRÉLEVÉS DANS LE RHIN EN AMONT ET EN AVAL DU CNPE DE FESSENHEIM (Bq/L d'eau de combustion)

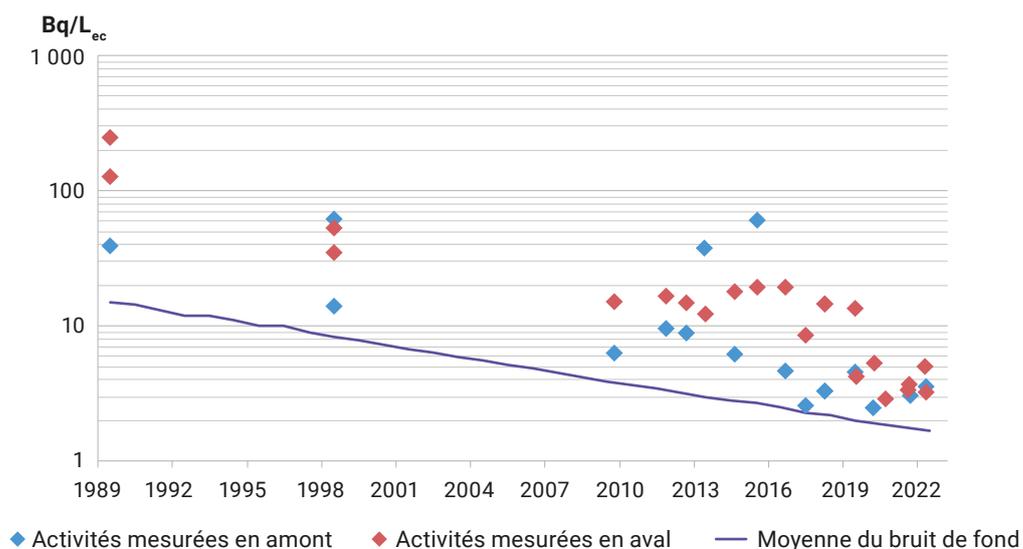


FIGURE 8 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ MASSIQUE DE COBALT-60 DANS LES VÉGÉTAUX AQUATIQUES DANS LE RHIN EN AMONT ET EN AVAL DU CNPE DE FESSENHEIM (Bq/kg sec)

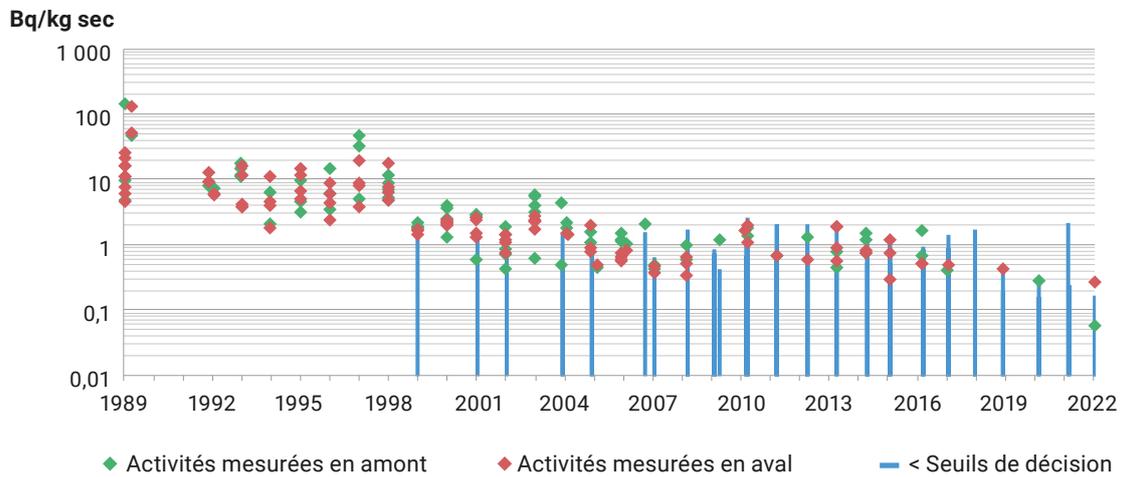
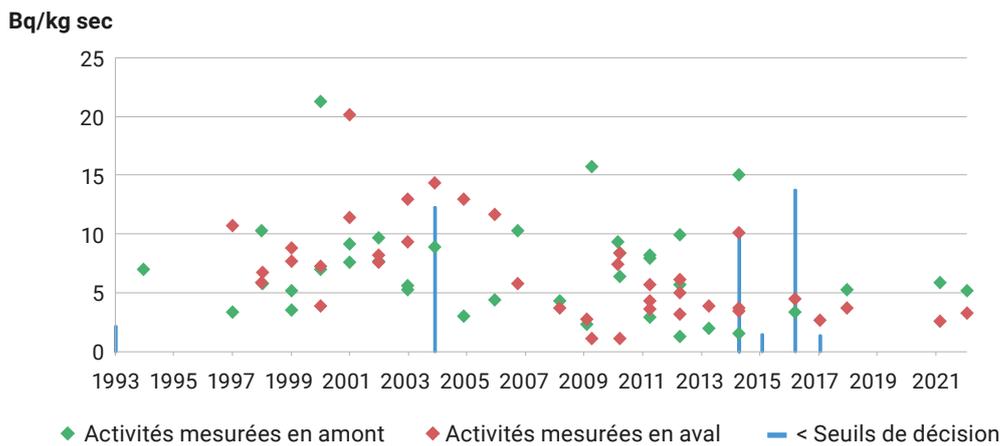


FIGURE 9 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ MASSIQUE D'IODE-131 DANS LES VÉGÉTAUX AQUATIQUES DANS LE RHIN EN AMONT ET EN AVAL DU CNPE DE FESSENHEIM (Bq/kg sec)



Les activités de carbone-14 dans les chairs de poissons collectées en aval de Fessenheim entre 2021 et 2023 (29,7 et 34,0 Bq/kg frais soit 231 et 256 Bq/kg de C) sont plus élevées que celles observées dans les poissons collectés en amont (figure 10). Elles montrent l'occurrence d'un marquage par les rejets liquides du site. Depuis le début des années 2000, les activités massiques de césium-137 dans les sédiments en aval (entre 2021 et 2023 : 5,09 et 8,4 Bq/kg sec) du site sont plus élevées que celles en amont (figure 11). La baisse des activités massiques de césium-137 dans les sédiments en amont de Fessenheim permet ainsi d'identifier la contribution des rejets du site. Quelques détections d'argent-110m dans les végétaux collectés

en aval en 2004, 2014 et 2019 sont à attribuer aux rejets du site. Les activités volumiques de tritium dans les eaux de boisson et d'irrigation entre 2021 et 2023 (0,9 à 1,9 Bq/L) captées dans la nappe d'accompagnement du Rhin, en aval du site, indiquent un marquage que l'on peut relier aux rejets liquides, même si elles sont proches du bruit de fond (0,8 Bq/L). Jusqu'en 2019, en aval de Fessenheim, les rejets du site augmentaient le marquage en tritium organiquement lié dans les poissons (figure 7), depuis 2020, les activités dans les muscles de poissons en aval du site (0,53 et 0,63 Bq/kg frais soit 3,3 et 3,4 Bq/L_{ec}) se sont rapprochées de celles mesurées en amont, en cohérence avec la baisse des rejets.

FIGURE 10 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ DE CARBONE-14 DANS LES POISSONS COLLECTÉS DANS LE RHIN EN AMONT ET EN AVAL DU CNPE DE FESSENHEIM (Bq/kg de carbone)

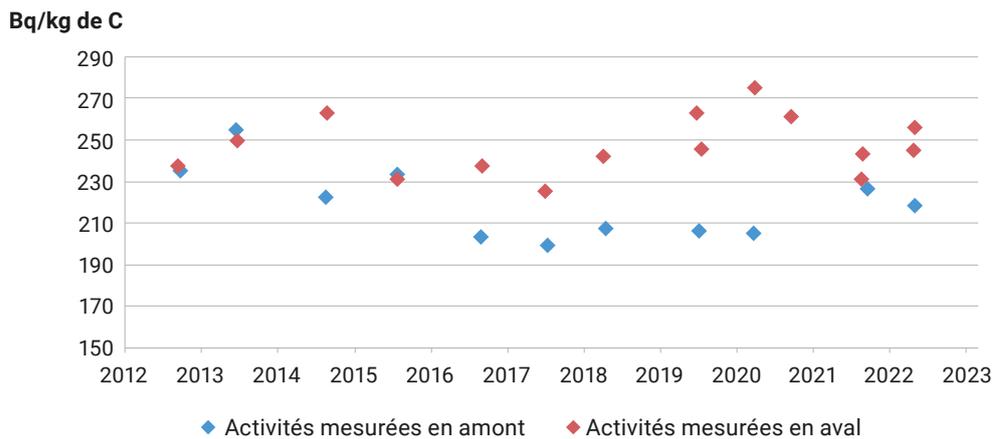
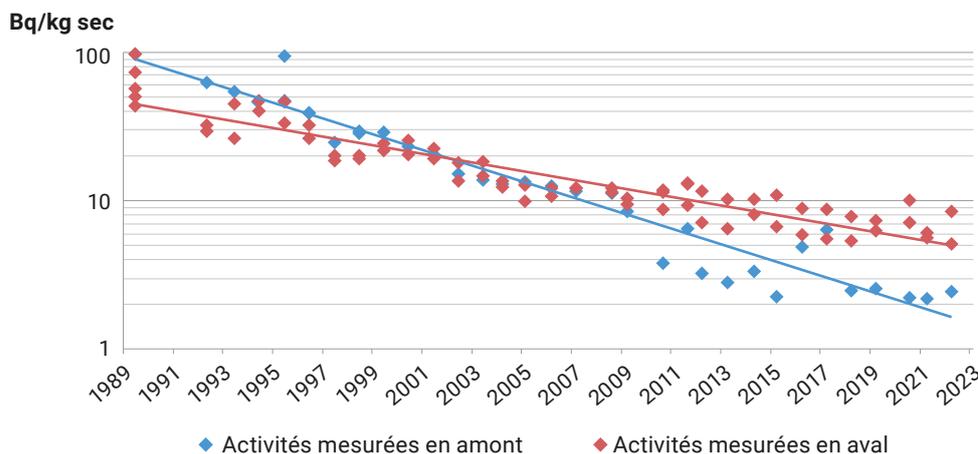


FIGURE 11 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ MASSIQUE DE CÉSIUM-137 DANS LES SÉDIMENTS COLLECTÉS DANS LE RHIN EN AMONT ET EN AVAL DU CNPE DE FESSENHEIM (Bq/kg sec)



Les résultats de mesures radiologiques des échantillons environnementaux prélevés dans les environnements terrestre et aquatique du site de Fessenheim montrent que l'influence des rejets est quantifiable au travers des activités de tritium dans l'air, l'eau de pluie, l'herbe, la salade et l'eau de boisson, ainsi que de celles du carbone-14 dans les poissons, du césium-137 dans les sédiments, très ponctuellement de l'argent-110m dans les végétaux aquatiques.

Les activités dans l'air et dans le compartiment terrestre montrent que l'influence des rejets atmosphériques est restreinte aux cinq premiers kilomètres. La dose qui résulterait de la consommation de denrées locales, en supposant qu'elles soient produites dans un rayon de 5 km autour du site, serait de l'ordre de 0,005 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette dose est quasiment exclusivement liée au tritium. L'exposition par inhalation d'air est négligeable au regard de l'exposition potentielle liée à la consommation de denrées locales.

L'influence des rejets d'effluents liquides contenant du carbone-14 et du tritium est visible en aval du site. Cependant, elle est en partie masquée par les rejets d'installations suisses qui marquent l'environnement en amont. L'interprétation des résultats de mesures radiologiques des denrées prélevées dans l'environnement aquatique en aval du site de Fessenheim montre que les rejets liquides du site contribuent au marquage de carbone-14 des poissons et de tritium des eaux de boisson. La dose résultant d'une consommation occasionnelle de poissons liée à une activité de pêche de loisir en aval du site est extrêmement faible, elle est estimée à 0,0001 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. La consommation d'eau captée dans la nappe d'accompagnement du Rhin en aval du site conduirait à une dose estimée à 0,0001 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en lien avec la présence de tritium.

La dose totale atteindrait ainsi 0,0052 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

En raison d'activités extrêmement faibles, les radionucléides présents dans les rejets autres que le carbone-14 et le tritium (^{60}Co et $^{110\text{m}}\text{Ag}$ notamment) ne sont mesurables que dans certaines composantes non consommées du compartiment aquatique, en mettant en œuvre les meilleures techniques disponibles. Même s'il existe une potentielle contribution des rejets du site, les activités de césium-137 dans l'environnement du CNPE ont quant à elles pour origines majoritaires les retombées de l'accident de Tchernobyl et des essais atmosphériques d'armes nucléaires (chapitre 1).

FOCUS CARACTÉRISATION DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE FESSENHEIM À LA SUITE DE LA MISE À L'ARRÊT DÉFINITIF DES RÉACTEURS – ÉTAT DE RÉFÉRENCE AVANT DÉMANTÈLEMENT

Objectif

En complément de la surveillance radiologique régulière de l'environnement du site de Fessenheim, une campagne spécifique de prélèvements a été réalisée par l'IRSN en 2020, à la suite de la mise à l'arrêt définitif (MAD) des deux réacteurs à eau pressurisée (REP) de 900 MWe, après plus de 40 années d'exploitation et avant leur démantèlement. L'objectif est

de disposer d'un état de référence de la radioactivité dans l'environnement du site pour les principaux radionucléides rejetés lors du fonctionnement des deux réacteurs ou pouvant être émis lors des opérations de démantèlement afin de pouvoir suivre, par la suite, l'évolution de leur activité au cours de la phase de déconstruction. Cette campagne s'inscrit dans une stratégie d'évolution progressive de la surveillance régulière du site par l'IRSN lors des étapes de démantèlement, par la réalisation de prélèvements tous les 5 à 10 ans aux points de prélèvement qui apparaîtront pertinents à la suite de cette étude.

État radiologique de l'environnement terrestre

Près d'une trentaine de prélèvements ont été réalisés dans l'environnement terrestre du CNPE dans le cadre de cette campagne (tableau 1, figure 1). 21 prélèvements de feuilles d'arbres et d'herbes ont été échantillonnés à proximité du site et jusqu'à 15 km du CNPE (voire 20 km lorsque le point de prélèvement n'était pas accessible) sous, et hors vents dominants, (direction nord-nord-est⁽¹⁾). Un prélèvement de sol et des spectrométries gamma *in situ* ont également été effectués. Néanmoins, une seule carotte⁽²⁾ de sol a pu être prélevée de manière à être analysée du fait de la sécheresse et de l'urbanisation d'une grande partie des points de prélèvement envisagés. En complément, des denrées locales ont été collectées chez des producteurs locaux : salade, fenouil, lait et vin. Deux prélèvements d'eau de boisson (robinet du réseau d'alimentation en eau potable) ont également été réalisés.

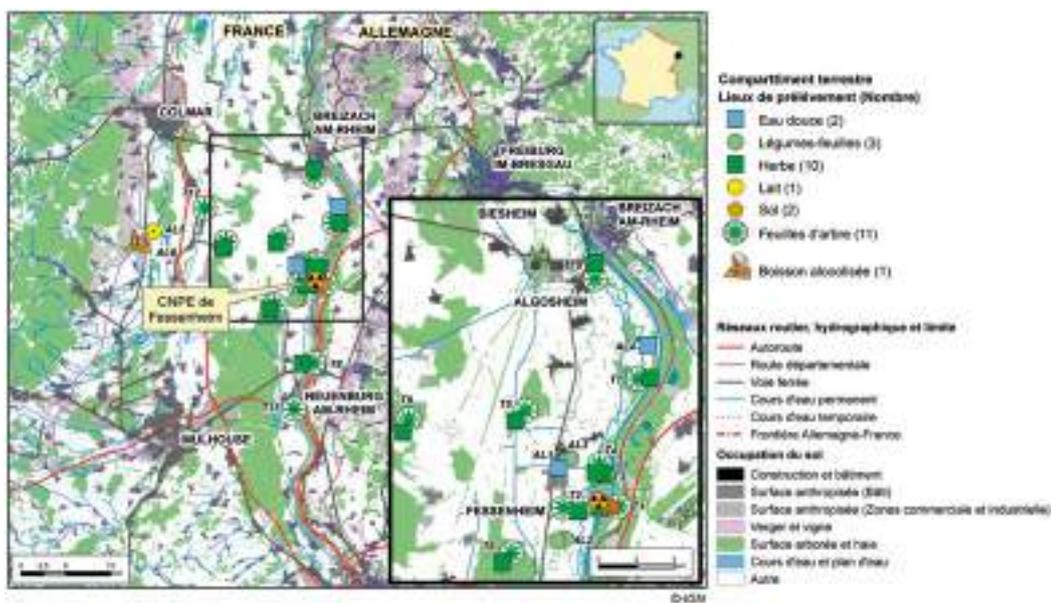
TABLEAU 1 / RÉPARTITION PAR NATURE DES PRÉLÈVEMENTS ET DES ANALYSES RÉALISÉS DANS L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE

Nature	Quantité	α et β globaux	Gamma	¹⁴ C	HTO	TOL	⁹⁰ Sr	Actinides
Boissons alcoolisées	1		X		X			
Eau de boisson	2	X			X			
Feuilles d'arbres	11		X	X	X	X		
Herbes	10		X	X	X	X		
Lait	1		X		X	X	X	
Légumes feuilles	3		X	X	X	X		
Sols	1		X					X

(1) Aucun prélèvement n'a été réalisé en Allemagne.

(2) Prélèvement d'un échantillon du sous-sol terrestre.

FIGURE 1 / LOCALISATION DES PRÉLÈVEMENTS RÉALISÉS DANS L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE DU CNPE DE FESSENHEIM

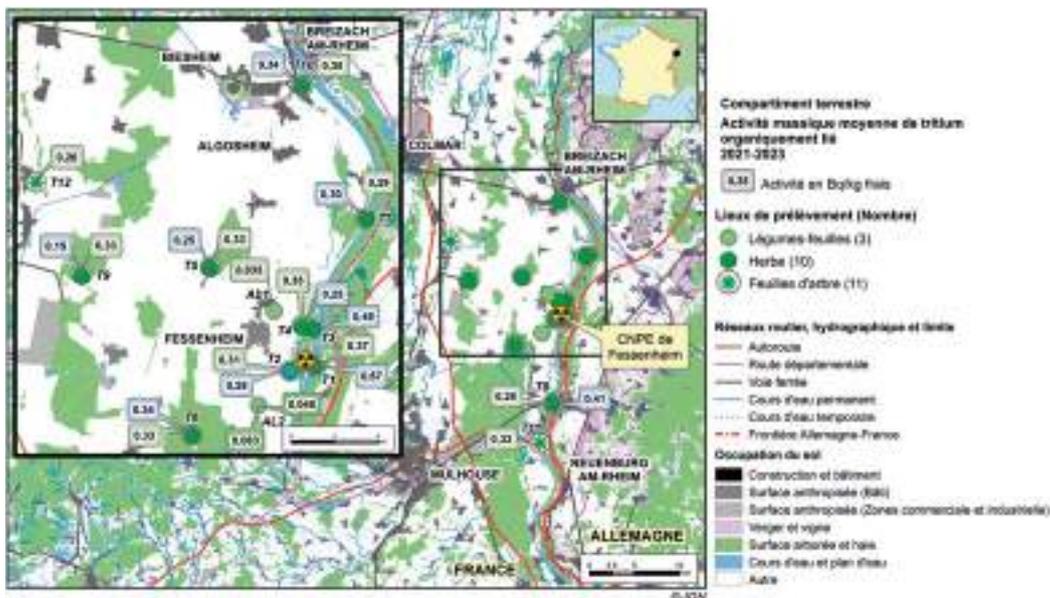


Aucune activité significative de tritium libre (HTO) n'a été mesurée dans le vin et dans les deux prélèvements d'eau de boisson, pour lesquels les indices d'activités alpha et bêta globaux sont inférieurs aux limites réglementaires des eaux destinées à la consommation humaine. Une activité de tritium libre ($0,75 \pm 0,17$ Bq/L) équivalente à l'activité moyenne du bruit de fond, a été mesurée dans le prélèvement de lait réalisé à Rouffach (AL5). Les activités de tritium libre dans les végétaux prélevés à moins de 5 km du site (entre 1,19 et 2,63 Bq/L d'HTO) sont du même ordre de grandeur que celles des végétaux prélevés en zone non influencée.

Les activités massiques de tritium organiquement lié (TOL) dans les herbes (entre 0,15 et 0,67 Bq/kg frais ; figure 2) sont du même ordre de grandeur que celles des prélèvements effectués dans le cadre de la surveillance régulière du site (de 0,11 à 0,41 Bq/kg frais mesuré à Nambshem pour les prélèvements réalisés entre 2018 et 2021). Dans les feuilles d'arbres, la variation des activités (entre 0,26 et 0,37 Bq/kg frais) est moindre que dans les herbes.

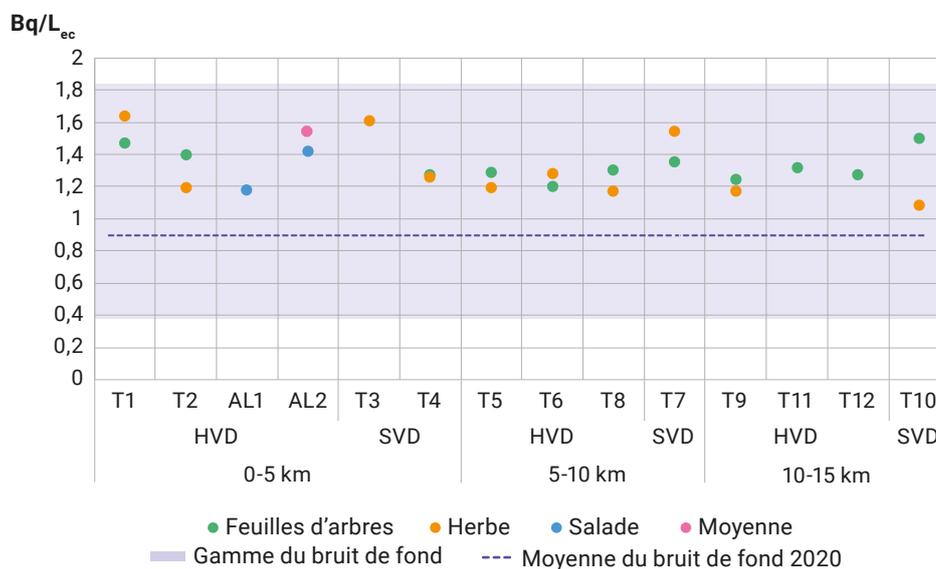
Les activités massiques de tritium organiquement lié dans les légumes feuilles sont comprises entre 0,03 et 0,08 Bq/kg frais, soit inférieures d'un facteur 10 aux valeurs des autres matrices végétales. Ces prélèvements sont majoritairement situés en dehors de l'axe des vents dominants, le long du canal du Rhin. Ces activités sont cohérentes avec celles mesurées dans le cadre de la surveillance de l'environnement réalisée annuellement.

FIGURE 2 / ACTIVITÉS DE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ DANS LES PRÉLÈVEMENTS D'ORIGINE VÉGÉTALE



Les activités de tritium organiquement lié dans les végétaux terrestres exprimées en becquerels par litre d'eau de combustion (Bq/L_{ec}) permettent de mettre en évidence l'influence des rejets atmosphériques tritiés du CNPE (figure 3). Il apparaît que les activités sont toutes comprises dans la gamme du bruit de fond radiologique du tritium en 2020 (0,39 à 1,9 Bq/L_{ec}), néanmoins elles sont toutes supérieures à l'activité moyenne du bruit de fond en France en 2020 de 0,9 Bq/L_{ec} . Ce graphique permet également de confirmer la cohérence des activités de tritium organiquement lié dans les prélèvements lorsqu'ils ont été prélevés aux mêmes endroits.

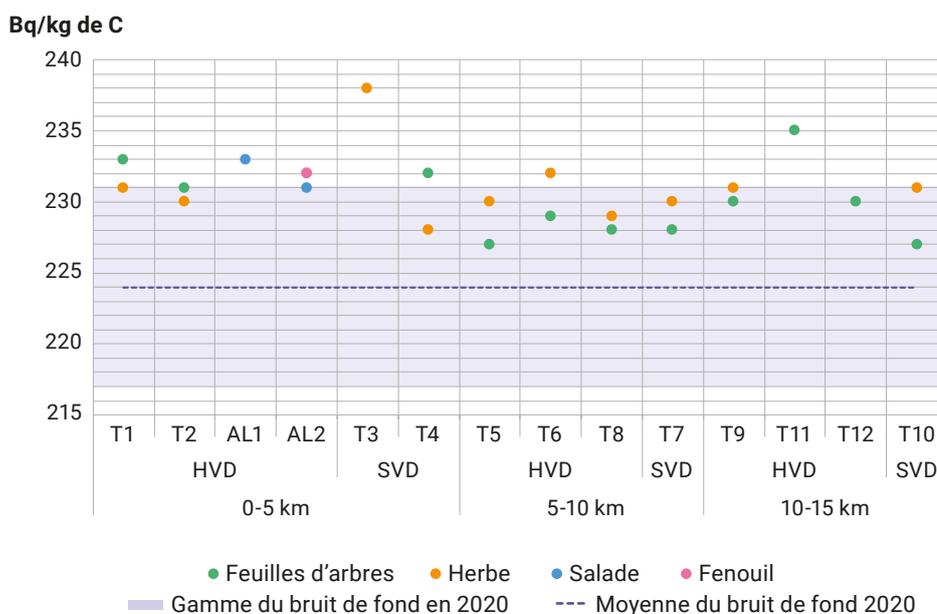
FIGURE 3 / ACTIVITÉS DE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ DANS LES VÉGÉTAUX TERRESTRES EN FONCTION DE LEUR DISTANCE AU SITE ET DE LEUR POSITION (hors vents dominants – HVD, et sous influence des vents dominants – SVD) (Bq/L d'eau de combustion)



Toutes les activités de carbone-14 dans les végétaux terrestres prélevés à différentes distances du site sont supérieures à la valeur moyenne du bruit de fond hors influence de 224 Bq/kg de carbone en 2020 (figure 4). Plus de 80 % des activités sont néanmoins comprises dans la gamme supérieure de variation du bruit de fond (de 224 à 232 Bq/kg de carbone), les 20 % restants étant au-dessus. Les activités les plus élevées sont mesurées dans les prélèvements situés entre 0 et 5 km, la plus élevée (238 ± 12 Bq/kg de carbone) étant mesurée dans le prélèvement d'herbe réalisé au point T3 situé à 1,5 km au nord du CNPE sous les vents dominants. En revanche un prélèvement de feuilles d'arbres (T11) réalisé à plus de 10 km dans un secteur hors influence présente une activité de 235 ± 12 Bq/kg de carbone nettement supérieure aux activités attendues à cette distance et dans ce secteur, sans qu'une explication ne puisse être avancée.

Ce graphique permet également de confirmer la cohérence des activités de carbone-14 dans les prélèvements d'herbes et de feuilles d'arbres lorsqu'ils ont été prélevés aux mêmes endroits.

FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE CARBONE-14 DANS LES VÉGÉTAUX TERRESTRES EN FONCTION DE LEUR DISTANCE AU SITE ET DE LEUR POSITION (hors influence des vents dominants HVD, et sous influence des vents dominants - SVD)



Sur l'ensemble des prélèvements analysés en spectrométrie gamma, seul le prélèvement d'herbe au point T3, situé à 1,5 km au nord-est du site et sous les vents dominants, présente une activité significative de césium-137 ($0,45 \pm 0,19$ Bq/kg sec), cohérente avec les activités usuellement mesurées dans l'environnement hors influence. Aucun autre radionucléide émetteur gamma d'origine artificielle n'a été détecté dans les prélèvements biologiques terrestres (lait, vin, légumes ou herbe).

Un seul prélèvement de sol a pu être effectué au point T1, dans l'axe Est-Sud-Est du site, une direction plus rarement explorée. En complément d'une mesure par spectrométrie gamma *in situ*, un prélèvement de surface et une carotte de 15 cm seulement, en raison de la nature du sol très rocheux et aride (avec des horizons 0-5 cm, 5-10 cm et 10-15 cm), ont été analysés (tableau 2).

TABLEAU 2 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE CÉSIUM-137 DANS LE PRÉLÈVEMENT DE SOL

Horizon (cm)	0-5	5-10	10-15
Activité (Bq/kg sec)	$21,3 \pm 2,9$	$22,7 \pm 3,1$	$32,9 \pm 4,3$

Les activités massiques de césium-137 dans ces trois horizons sont cohérentes avec l'activité mesurée par spectrométrie gamma *in situ* (18 ± 4 Bq/kg) et avec les niveaux observés en lien avec la rémanence des essais nucléaires atmosphériques et les retombées de l'accident de Tchernobyl dans l'est de la France.

À ce même point T1, dans le prélèvement de sol de surface, une activité significative d'américium-241 ($0,391 \pm 0,092$ Bq/kg frais) a également été mesurée par spectrométrie gamma. Des analyses complémentaires pour quantifier les isotopes du plutonium et préciser l'activité de l'américium-241 (spectrométrie alpha et scintillation liquide) ont été réalisées afin d'en déterminer l'origine (tableau 3). Le ratio des activités $^{241}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ de 2,4 montre que ces radionucléides proviennent des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires.

TABLEAU 3 / ACTIVITÉS MASSIQUES DES ISOTOPES DU PLUTONIUM ET DE L'AMÉRICIUM-241 DANS LE SOL PRÉLEVÉ AU POINT T1

	^{238}Pu	$^{239+240}\text{Pu}$	^{241}Pu	^{241}Am
Activité (Bq/kg sec)	< 0,041	$0,40 \pm 0,04$	$0,36 \pm 0,11$	$0,15 \pm 0,08$

Enfin, seul le prélèvement de lait de chèvre effectué au point AL5 (19 km dans une zone hors des vents dominants) a fait l'objet d'une détermination de l'activité de strontium-90. L'activité mesurée de $0,013 \pm 0,010$ Bq/L est cohérente avec les activités habituellement relevées dans cette matrice, imputable aux essais nucléaires atmosphériques.

État radiologique de l'environnement aquatique

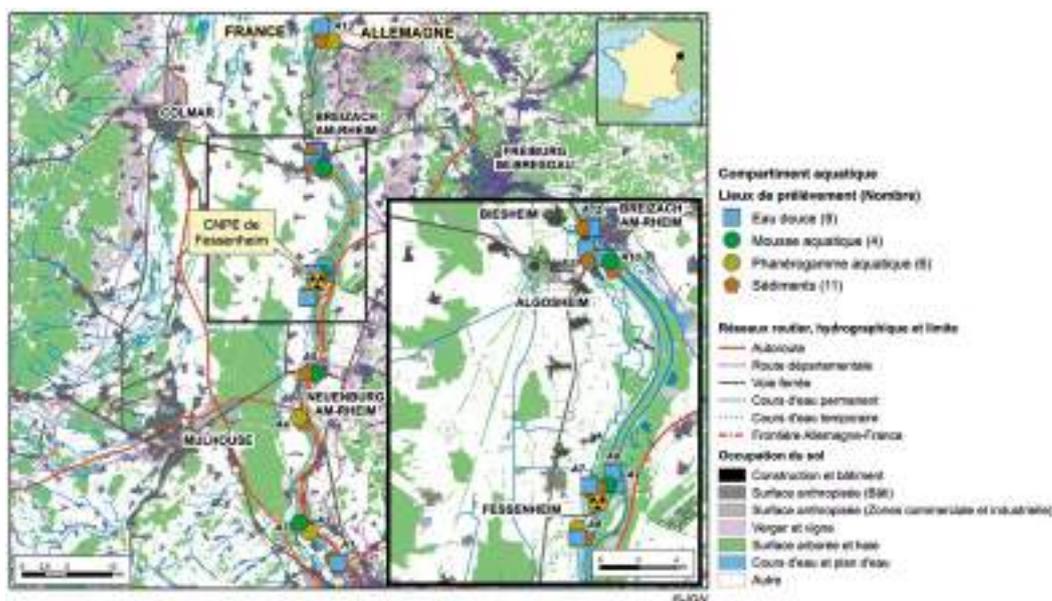
Les études radioécologiques menées dans le cadre de la surveillance de l'environnement aquatique en amont du site montrent que les apports par les retombées globales, les rejets de l'industrie horlogère (tritium issu des fabriques de matière luminescente et des ateliers d'horlogerie) et des installations électronucléaires suisses, ont une influence quantifiable dans le Rhin (sédiments, végétaux et poissons) en amont et en aval de Fessenheim.

Les 30 prélèvements réalisés dans le compartiment aquatique dans le cadre de cette étude sont majoritairement concentrés sur le canal du Rhin, sur une distance de 30 km en amont et 25 km en aval du CNPE (tableau 4). Des prélèvements ont également été réalisés dans le ruisseau du Muhlbach en amont et en aval du CNPE, ainsi que dans le ruisseau de Grungiessen et le port de Neuf-Brisach (figure 5). Ainsi, contrairement à la surveillance habituelle des eaux douces réalisée en 3 points du Rhin, cette étude s'est attachée à réaliser 3 fois plus de points de prélèvement sur le canal du Rhin mais également à étendre les prélèvements dans les principaux ruisseaux proches. De plus, à l'amont comme à l'aval, dans la mesure du possible, des sédiments et des végétaux aquatiques ont été prélevés à chaque point.

TABLEAU 4 / RÉPARTITION PAR NATURE DES PRÉLÈVEMENTS ET DES ANALYSES RÉALISÉS DANS L'ENVIRONNEMENT AQUATIQUE

Nature	Quantité	Gamma	^{14}C	HTO	TOL
Eau douce	9	X		X	
Mousses aquatiques	4	X			
Phanérogames immergées	6	X	X		X
Sédiments	11	X			

FIGURE 5 / LOCALISATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT RÉALISÉS DANS L'ENVIRONNEMENT AQUATIQUE DU CNPE DE FESSENHEIM



Sur les 9 prélèvements d'eau, seules 3 activités significatives de tritium libre (HTO) ont été quantifiées ($SD \approx 2,4-2,6$ Bq/L) en 3 points situés en aval du site :

- à Vogelgrun ($5,3 \pm 2,6$ Bq/L), dans le grand canal d'Alsace en amont de l'écluse ;
- dans le ruisseau de Grunguessen, en amont du canal de Neuf-Brisach ($4,4 \pm 2,6$ Bq/L) ;
- dans le port du canal de Neuf-Brisach ($23,2 \pm 3,3$ Bq/L).

L'activité volumique de l'eau prélevée dans le port du canal de Neuf-Brisach est l'activité de tritium libre la plus élevée mesurée dans le cadre de cette campagne. L'activité dans le Grunguessen en amont de la confluence avec le canal de Neuf-Brisach ($4,4 \pm 2,6$ Bq/L) est du même ordre que celle mesurée dans le prélèvement effectué directement dans le grand canal ($5,3 \pm 2,6$ Bq/L). Le Grunguessen est potentiellement influencé par les eaux du grand canal d'Alsace, et donc par les rejets du CNPE. Ce cours d'eau alimente lui-même le canal de Neuf-Brisach via le Muhlbach. L'activité volumique la plus élevée au niveau de l'infrastructure portuaire peut s'expliquer par la présence d'un volume d'eau marqué par les rejets du CNPE et retenu par l'écluse à la sortie du canal de Neuf-Brisach, qui l'isole périodiquement de l'eau du Rhin. Cela est cohérent avec un rejet liquide en cours le 21 juillet 2020, et justifie l'importante différence entre les activités du Rhin et du Grunguessen, dont l'écoulement est permanent, et celles au niveau de l'écluse, dont l'écoulement principal est intermittent.

Le marquage en tritium est également visible dans les prélèvements de végétaux aquatiques avec des activités de tritium organiquement lié en aval (respectivement de $14,6 \pm 1,0$; $29,0 \pm 2,0$ Bq/kg sec au point A10 et $6,56 \pm 0,46$ Bq/kg sec au point A13) supérieures aux activités mesurées en amont ($3,39 \pm 0,24$ Bq/kg sec au point A2 et $2,33 \pm 0,16$ Bq/kg sec au point A4). Dans le Grunguessen, l'activité mesurée ($2,49 \pm 0,17$ Bq/kg sec) est du même ordre de grandeur que celle mesurée dans les prélèvements en amont.



Les activités massiques de carbone-14 dans les végétaux aquatiques (197 Bq/kg de carbone en moyenne) sont équivalentes en amont et en aval. Ces activités sont plus faibles qu'en milieu terrestre en raison de la dilution de ce radionucléide dans des carbonates anciens qui en sont dépourvus ou qui présentent de très faibles teneurs en carbone-14. Ainsi, la plupart des activités de carbone-14 dans les échantillons de plantes aquatiques sont comme attendu, inférieures à la valeur de référence du bruit de fond en milieu terrestre (224 Bq/kg de C en 2020) du fait de la dilution du carbone-14 dans les carbonates présents dans le cours d'eau.

Aucun radionucléide artificiel émetteur gamma n'a pu être quantifié dans les 9 prélèvements d'eau réalisés. Le césium-137 a été systématiquement quantifié dans les 11 prélèvements de sédiments (de $3,14 \pm 0,44$ à 8 ± 1 Bq/kg sec) et dans les 10 prélèvements de végétaux aquatiques (de $1,5 \pm 0,5$ à $3,5 \pm 0,5$ Bq/kg sec). Les activités massiques sont du même ordre de grandeur en amont et en aval du CNPE, et cohérentes avec celles usuellement rencontrées hors influence, ne permettant pas de mettre en évidence une influence des rejets du site. En revanche, la détection d'une activité significative d'argent-110m, uniquement en aval immédiat du CNPE (point A8) ($0,38 \pm 0,18$ Bq/kg sec) dans le prélèvement de sédiment, témoigne de l'influence des rejets du site. Enfin, 3 prélèvements de mousses aquatiques sur les 4 réalisés présentent des activités significatives de cobalt-60 du même ordre de grandeur à l'amont et à l'aval ($0,67 \pm 0,2$ Bq/kg sec et $0,70 \pm 0,19$ à l'amont et $0,78 \pm 0,27$ Bq/kg sec à l'aval), ne permettant pas de discriminer l'influence des rejets du CNPE de Fessenheim de celle des rejets des centrales suisses situées plus en amont.

Conclusion

La campagne de prélèvements réalisée en juillet 2020 a permis de compléter les données et connaissances déjà disponibles afin de réaliser un état de référence des niveaux de radioactivité dans les compartiments terrestre et aquatique de l'environnement du CNPE de Fessenheim au moment de la mise à l'arrêt définitif des deux réacteurs et avant le démarrage des opérations de démantèlement.

Il apparaît que l'influence du CNPE de Fessenheim dans le compartiment terrestre n'est visible qu'à courte distance du site (moins de 5 km), sous les vents dominants dans les végétaux (TOL et ^{14}C) et sur la rive opposée au CNPE (TOL). Les autres radionucléides artificiels mesurés significativement (isotopes du plutonium et le césium-137) sont imputables à la rémanence des retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl.

L'influence du CNPE dans le compartiment aquatique a été observée dans l'eau (tritium), les matières en suspension et sédiments ($^{110\text{m}}\text{Ag}$) et les végétaux aquatiques (TOL). Il convient de noter que l'influence des installations nucléaires suisses est également visible, des traces de cobalt-60 ayant par exemple été mesurées en amont du CNPE dans les mousses aquatiques.

Une deuxième campagne, envisagée en 2025, permettra de confirmer les niveaux observés. Elle pourra être enrichie de nouveaux prélèvements et radionucléides susceptibles d'apparaître lors des opérations de démantèlement (HT, ^{63}Ni ou ^{55}Fe).



© Quenneville Céline/IRSN

Prélèvement de sédiments à l'aide d'un cône de Berthois

2.3. LES SITES INDUSTRIELS

Le site de Malvési

Depuis 1959, l'usine Orano de Malvési, localisée à 3 km au nord de la ville de Narbonne (département de l'Aude) (figure 1), assure la purification de concentrés miniers d'uranium (« yellow cake ») et la conversion de l'uranium en UF_4 . La production annuelle de l'usine de conversion est de 9 285 tonnes (2022). 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 Orano de Malvési comporte d'anciens bassins d'effluents (B1/B2), aujourd'hui dédiés à l'entreposage de déchets historiques (INB ÉCRIN).

Rejets et plan de surveillance

Les rejets de radionucléides de l'usine de Malvési contiennent exclusivement de l'uranium naturel. Les rejets liquides constitués uniquement d'eaux pluviales traitées (par procédé d'osmose inverse) sont effectués dans le canal de Tauran, qui longe le site de Malvési, après contrôle. 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 en 2022 est de 3,3 kg, équivalant à 0,08 GBq d'uranium naturel. La quantité d'uranium rejetée dans l'atmosphère par les différents ateliers de l'usine a été de 1,3 kg pour l'année 2022, correspondant à 0,03 GBq d'uranium naturel. Ainsi, les rejets d'uranium dans l'atmosphère ont peu varié depuis la période d'observation précédente (2018-2020), à l'exception de l'année 2020 lors de la crise du Covid-19 (figure 2).

FIGURE 1 / LOCALISATION DU SITE ORANO MALVÉSI (Aude) ET LOCALISATION DES POINTS DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

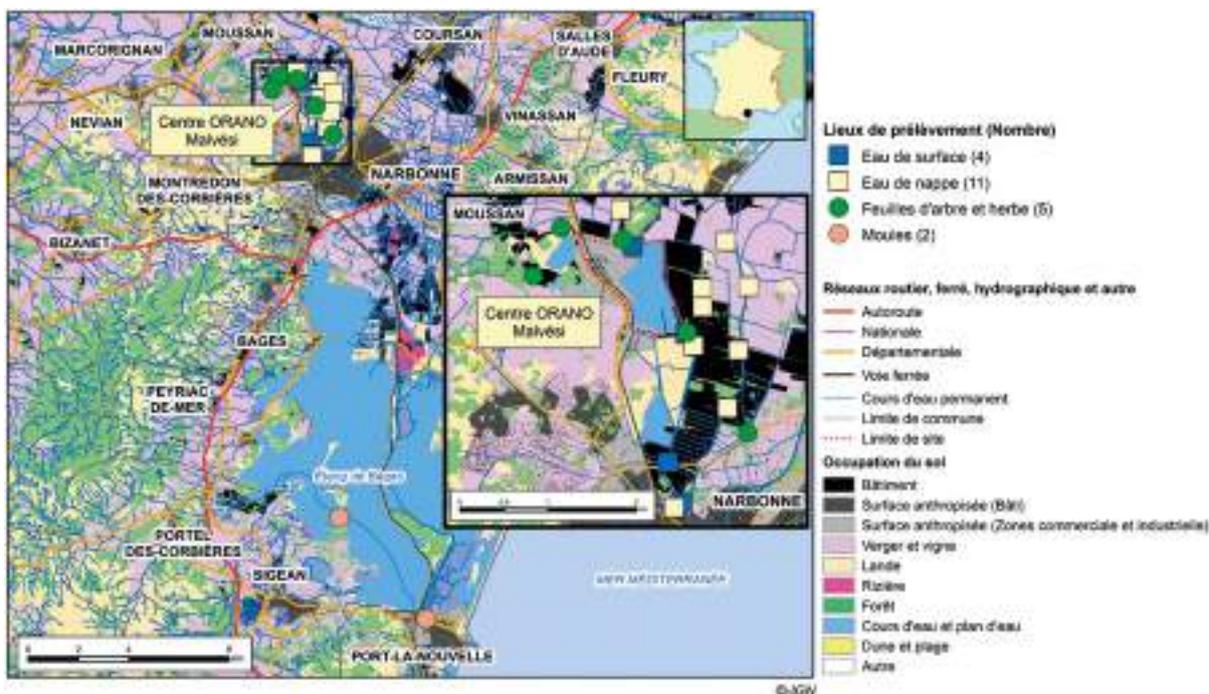
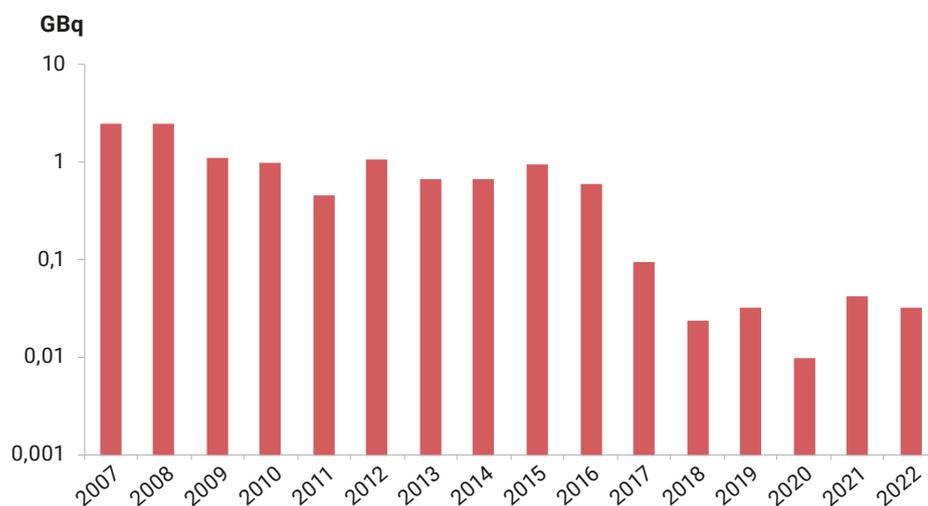


FIGURE 2 / CHRONIQUE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES ANNUELS D'URANIUM NATUREL DE L'USINE ORANO DE MALVÉSI (GBq/an)



Au niveau de l'INB ECRIN, la couverture bitumineuse des bassins B1 et B2 finalisée fin 2020, a permis de supprimer les rejets diffus de radionucléides provenant de cette installation. Les eaux pluviales sont collectées au niveau de la couverture bitumineuse de l'INB puis envoyées vers un bassin d'eau pluviale pour être contrôlées et traitées, avant rejet dans le canal de Tauran ou réutilisées pour réduire ainsi les prélèvements d'eau dans le milieu.

L'usine de conversion de l'uranium de Malvesi est soumise à la réglementation des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et aux prescriptions de son arrêté préfectoral de 2017 en matière de surveillance de l'environnement. La surveillance de l'INB ECRIN, encadrée réglementairement par des décisions de l'ASN, s'inscrit également dans le plan de surveillance de l'usine. Le plan de prélèvement réalisé par l'exploitant découle non seulement des exigences de l'arrêté préfectoral, mais aussi des demandes de l'Observatoire des rejets et également de l'initiative propre à l'exploitant. Ainsi, Orano dispose d'un réseau de dosimètres qui mesurent le débit de dose à la clôture du site.

En plus de ces mesures, l'exploitant effectue des prélèvements périodiques dans le compartiment aquatique, dans le canal de Tauran, en amont et en aval du point de rejet, ainsi qu'en aval, dans la ville de Narbonne (canal de la Robine) et à Bages-Sigean. L'IRSN réalise également des prélèvements dans le compartiment aquatique, depuis le site jusqu'à l'étang de Bages-Sigean (prélèvements de moules). 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 Malvesi, en complément de la surveillance réglementaire effectuée par l'exploitant, l'IRSN privilégie la mesure de l'uranium dans les eaux de surface (canal de Tauran) et les végétaux terrestres (feuilles d'arbres et herbe).

Le tableau 1 présente les plans de surveillance de l'environnement du site d'Orano Malvesi réalisés par l'exploitant et par l'IRSN.

TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT RÉALISÉS PAR ORANO ET L'IRSN

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Orano				IRSN			
	Précision	Fréquence annuelle	Nombre de points de prélèvement	Analyses	Précision	Fréquence annuelle	Nombre de points de prélèvement	Analyses
Rayonnement	Clôture site	4	22	DeD				
	B1	12	1					
Air	Activité du radon	12	3	Rn				
Aérosols	Tauran 600, Tauran B8, Œillal, bassin B1 et portail nord	12	5	AG, BG		52	1	Gamma, U
	Cumul sur 4 filtres consécutifs par point de prélèvement	2	5	²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁸ U, ²³⁸ Pu, ²³⁹⁻²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Am, ¹³⁷ Cs				
Eau de cours d'eau	Amont RU	4	1	AG, BG, U				
	PV0, PV1, PV3, écluse de Mandirac et Sainte-Lucie	1	5	U				
	Rocade	52	1	U				
	T600	52 12	1	U AG, BG				
Eau d'étang	Bages 9, 10 et 11	1	3	U				
Eau de nappe	Piézomètres et puits	4	30	AG, BG, U	Eau douce	2	2	U
		2	5	⁹⁹ Tc				
Eau de pluie	Jauge T600	12	1	AG, BG		12	1	Gamma, U
Faune aquatique	Mollusques/coquillages aux 3 points Bages	Tous les 3 ans	3	U	Poissons	1	1	Gamma, U
	Poissons à T600, PV3 et les points Bages	Tous les 3 ans	5	U				
Lait						2	1	Gamma, U
Principales productions agricoles	Légumes et fines herbes : 2 prélèvements possibles par point de prélèvement points 12, 13, 16 et 17 selon espèces agricoles racinaires ou aériennes	1	4	U	Légumes fruits	1	1	Gamma, U
					Légumes racines	1	1	Gamma, U
					Céréales	1	1	Gamma, U
Sédiments dulçaquicoles	Œillal, T600, rocade, PV3	1	4	U		2	2	Gamma, U, Pu, Am
Sédiments marins	Bages 9, 10 et 11	1	3	U				
Sol	Points 12, 13, 16 et 17	1	4	U		1	1	Gamma, gamma <i>in situ</i>
Végétaux aquatiques	Macrophytes : Œillal, T600, rocade et PV3	1	4	U				
Végétaux terrestres	Points 12, 13, 16 et 17	1	4	U	Aiguilles de conifère	1	2	Gamma, U
					Herbe	1	1	Gamma, U

AG : alpha global - Am : américium - BG : bêta global - DeD : débit de dose gamma ambiant - Pu : plutonium - Rn : radon
Sr : strontium - U : uranium.

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

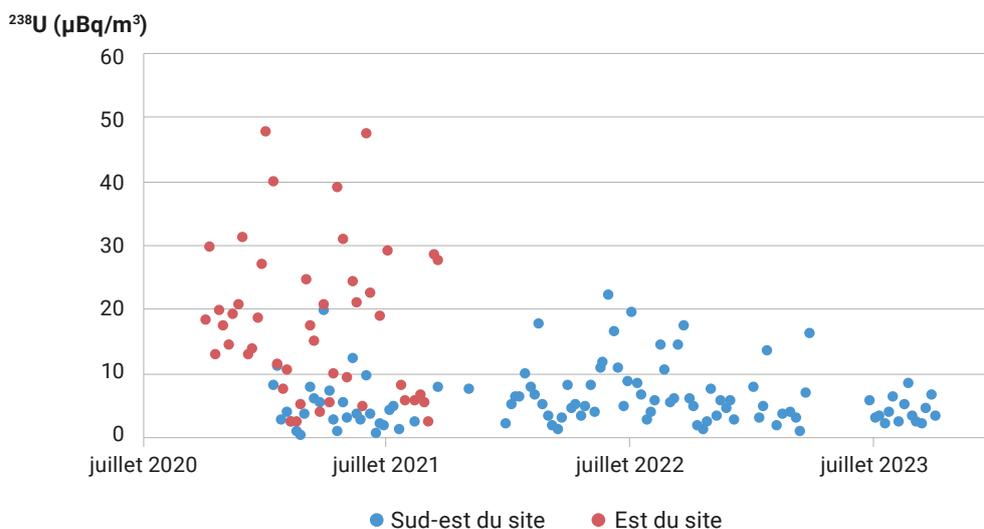
Les isotopes de l'uranium (^{234}U , ^{235}U et ^{238}U) sont les radionucléides pour lesquels l'influence du site de Malvési est la plus visible dans l'environnement terrestre et aquatique. En effet, les rejets en uranium provenant de la conversion contribuent à une augmentation locale de l'activité en uranium des poussières atmosphériques qui se déposent ensuite sur les végétaux terrestres.

Afin d'évaluer précisément l'activité volumique de l'uranium dans l'air de l'environnement extérieur du site, l'IRSN a installé 2 stations de collecte d'aérosols à grand débit ($300\text{ m}^3/\text{h}$) entre octobre 2020 et septembre 2021, dans des conditions expérimentales identiques, en bordure sud-est et à l'est du site, dans le cadre d'une étude radiologique de site (ERS ; focus p. 108). Pour ces deux points de prélèvement, les distances par rapport aux cheminées de rejets du site sont comparables (environ $1\,200\text{ m}$). Dans le cadre de cette ERS, des prélèvements d'air ont également été effectués à Narbonne ainsi qu'à Cuxac-d'Aude (5 km au nord du site). À la suite de cette étude, l'IRSN a pérennisé une station de collecte d'aérosols moyen débit ($80\text{ m}^3/\text{h}$) au point sud-est du site dans le cadre de son plan de surveillance. En revanche, il n'a pas été possible de pérenniser la station à l'est, car elle est située sur le terrain d'un particulier.

Aux deux sites de prélèvement situés à proximité du site, les activités volumiques de l'uranium-238 dans l'air sont très variables (figure 3). L'activité moyenne dans l'air du site la plus élevée ($18\text{ }\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air) est mesurée à l'est du site, alors que celle au sud-est du site est plus faible ($6,3\text{ }\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air). Pour ces deux chroniques, les variations de l'activité volumique en uranium au cours du temps sont liées essentiellement à l'orientation des vents qui dirigent le rejet atmosphérique de l'usine vers les stations de collecte d'aérosols. À la station de prélèvement d'aérosols située à l'est du site, le thorium-234 est mesuré de manière sporadique à une activité volumique moyenne de $56\text{ }\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air, en lien avec des travaux sur les bassins industriels du site.

La comparaison des activités volumiques à l'est et au sud-est du site avec les mesures d'uranium-238 réalisées à Narbonne ($0,8\text{ }\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air, en moyenne) et à Cuxac-d'Aude ($0,5\text{ }\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air, en moyenne) rend compte de l'activité ajoutée dans l'atmosphère par le site industriel. Enfin, la comparaison avec les mesures réalisées en 2010 dans les mêmes conditions opératoires montre que l'activité volumique en uranium dans l'air a diminué d'un facteur sept environ, en lien avec la baisse des rejets atmosphériques d'uranium par le site depuis 2010 (figure 2).

FIGURE 3 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES EN URANIUM-238 DANS L'AIR À L'EST ET AU SUD-EST DU SITE DE MALVÉSI ENTRE 2020 ET 2023 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)



Dans les fruits, les légumes et l'herbe prélevés dans l'environnement du site par Orano, les activités sont inférieures aux seuils de décision. Celles mesurées dans ces matrices par l'IRSN sont exploitées avec celles de l'ERS dans le focus p. 108. Les activités massiques d'uranium-238 dans les feuilles de frêne donnent une bonne image de l'uranium ajouté dans le milieu terrestre sous les vents dominants, à l'est du site (cf. focus, p. 108). La chronique de l'évolution temporelle de l'uranium mesuré dans les feuilles d'arbres montre que l'uranium ajouté par les rejets diminue fortement depuis 2007 avec des activités divisées par 10 environ (figure 4). Entre 2020 et 2022, elles varient entre 20 et 50 Bq/kg sec, à l'est du site, et 2 et 6 Bq/kg sec, au nord. Comme observé dans l'air, la diminution de l'uranium dans les végétaux terrestres est la conséquence de la baisse de l'activité rejetée par le site industriel au fil des années (figure 2).

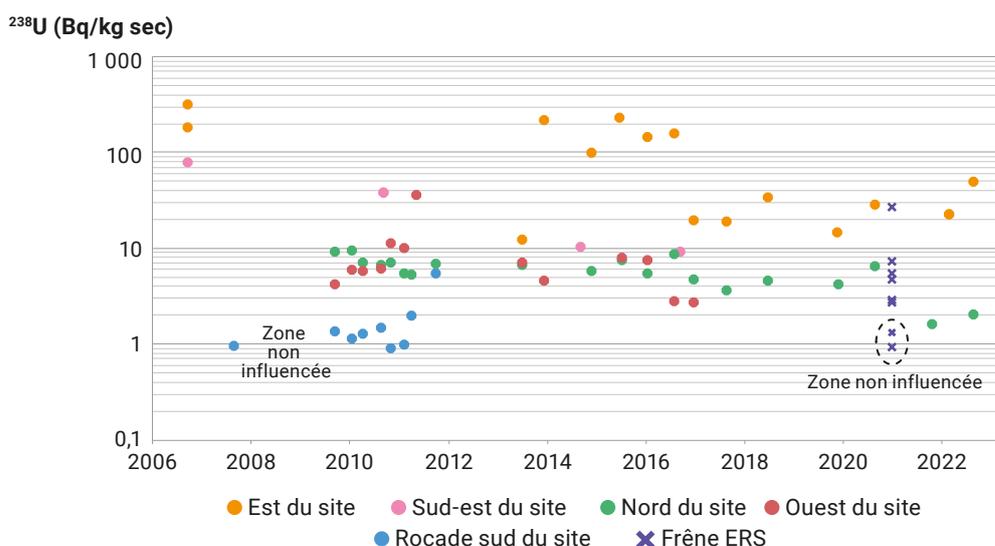
Dans les eaux de surface prélevées à l'amont des rejets (canal de Tauran), la concentration volumique en uranium est dans 45 % des cas inférieure au seuil de décision (0,5 µg/L). Dans ce cours d'eau, la concentration volumique moyenne en uranium à l'aval du point de rejet du site est de 2,6 µg/L pour la période 2020-2023, ce qui correspond à une activité volumique moyenne d'uranium-238 de 0,03 Bq/L. Cependant, des valeurs significativement supérieures à cette moyenne (> 10 µg/L) sont mesurées ponctuellement, en aval

proche et en aval lointain du point de rejet dans le compartiment aquatique (figure 5).

La concentration moyenne de 2,6 µg/L observée en aval du point de rejet, entre 2020 et 2023, est relativement proche de celle de la précédente période d'observation (2,1 µg/L entre 2018 et 2020). Stable depuis 2012 (1 à 2 µg/L à l'exception de 2018 : 10 µg/L), la concentration moyenne en uranium dans le canal de Tauran a diminué depuis le début des années 2000 (> 20 µg/L, à cette époque) (figure 6). Cette concentration volumique moyenne dans l'eau prélevée à l'aval des rejets est inférieure à la valeur guide proposée par l'OMS (30 µg/L) pour les eaux destinées à la consommation.

Le suivi de l'eau de la nappe phréatique, prélevée dans les puits des riverains du site, montre que la concentration volumique en uranium varie d'un point de prélèvement à un autre (figure 7). Pendant la période d'observation (2021-2023), la concentration moyenne en uranium est de 2,4 µg/L, équivalente à une activité moyenne d'uranium-238 de 0,03 Bq/L⁽¹⁾, sans que l'origine de l'uranium soit connue avec certitude (naturelle ou liée au site). Toutes les valeurs observées sont inférieures à la valeur guide proposée par l'OMS (30 µg/L) pour les eaux destinées à la consommation.

FIGURE 4 / ÉVOLUTION AU COURS DU TEMPS DE L'ACTIVITÉ MASSIQUE EN URANIUM-238 DANS LES FEUILLES D'ARBRES PRÉLEVÉES À PROXIMITÉ DU SITE ORANO DE MALVÉSI (Bq/kg sec)



(1) L'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites de référence pour la qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, ne définit pas de valeur limite de potabilité pour les radionucléides émetteurs alpha comme l'uranium, mais indique qu'une analyse spécifique des radionucléides est requise dès lors que l'activité a globale dépasse 0,10 Bq/L.

FIGURE 5 / TENEUR EN URANIUM DANS L'EAU DU CANAL DE TAURAN, EN AMONT ET EN AVAL DES REJETS LIQUIDES DU SITE ORANO DE MALVÉSI ENTRE 2011 ET 2023 ($\mu\text{g/L}$)

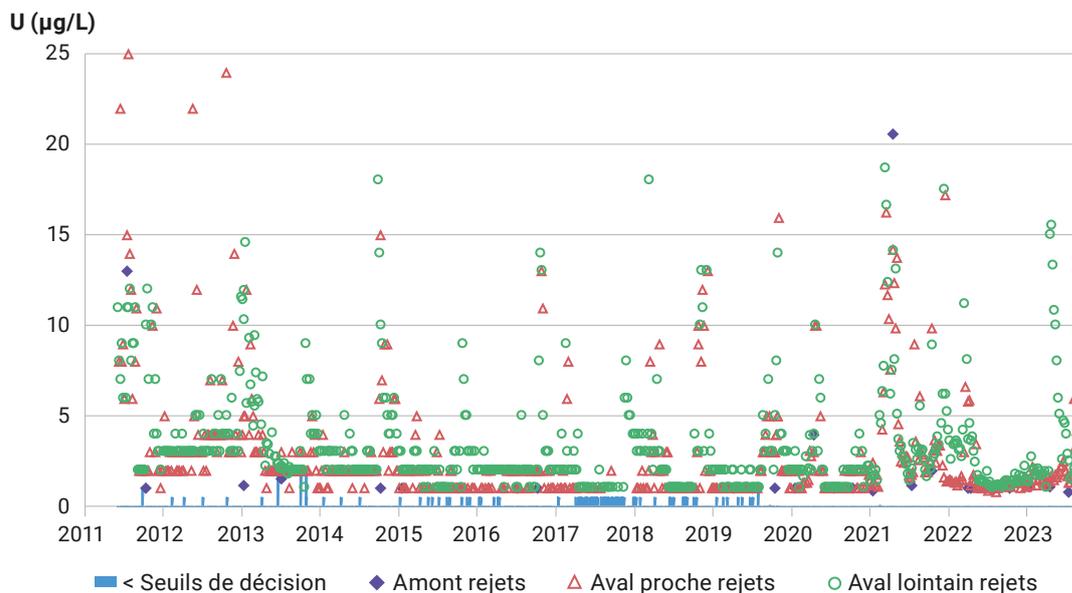


FIGURE 6 / CHRONIQUE DES CONCENTRATIONS VOLUMIQUES MOYENNES ANNUELLES EN URANIUM ET DES INDICES ALPHA GLOBAUX ANNUELS (Bq/L) DANS LES EAUX DU CANAL DE TAURAN, ENTRE 1994 ET 2023 ($\mu\text{g/L}$)

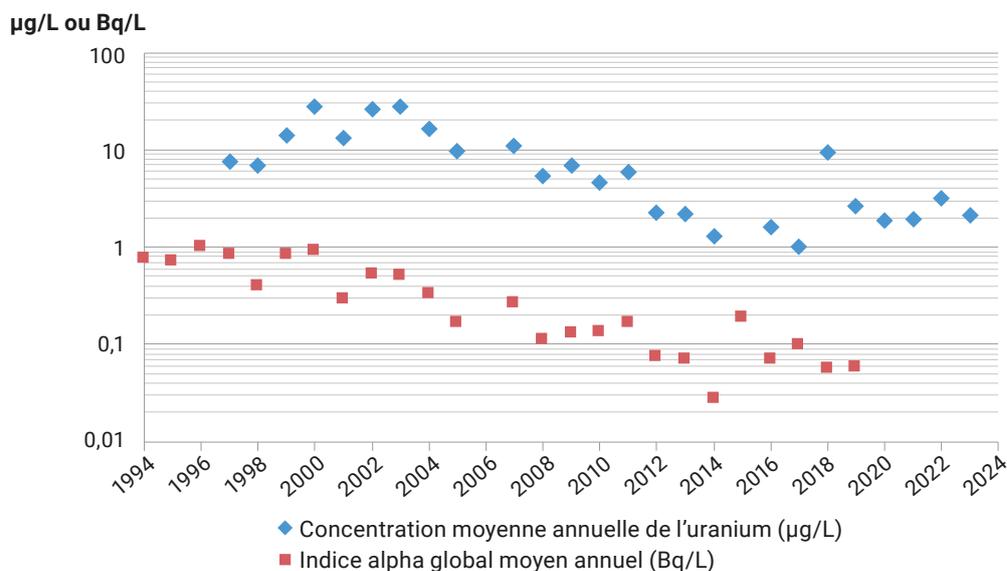
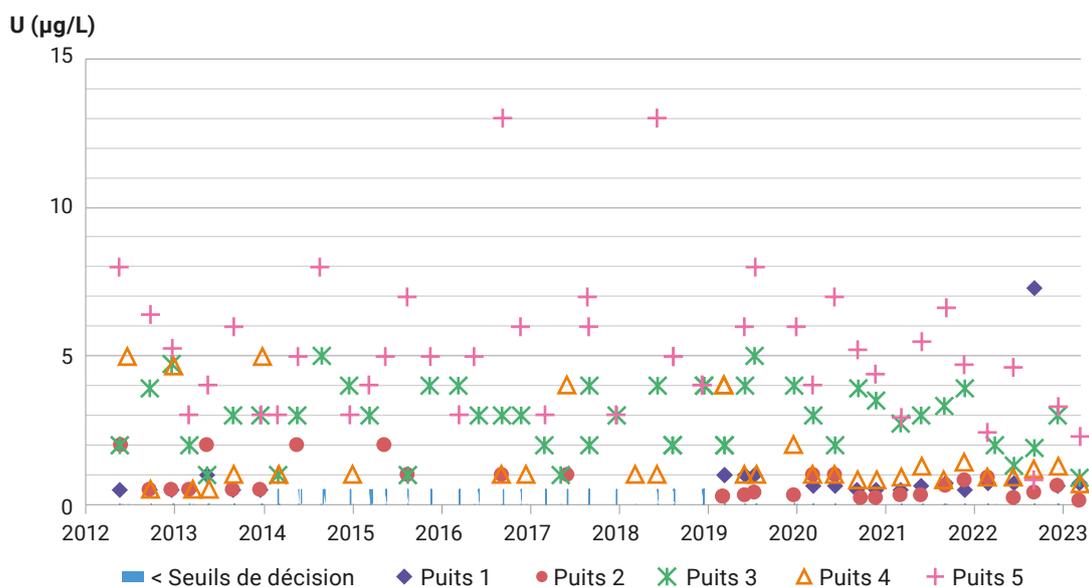


FIGURE 7 / CONCENTRATION VOLUMIQUE EN URANIUM DANS L'EAU PRÉLEVÉE DANS CINQ PUIITS DE RIVERAINS DE L'USINE ORANO DE MALVÉSI (µg/L)



Parmi les points d'observation de la nappe, le puits n° 5 qui possède la concentration volumique moyenne en uranium la plus élevée (5 µg/L), a fait l'objet d'une analyse plus approfondie. La comparaison avec les mesures réalisées dans le canal de Tauran, situé à proximité de ce puits, montre que les activités les plus élevées dans l'eau du puits (8 à 13 µg/L) sont observées lors de pics de concentration dans le canal (figure 8). Cette observation suggère que l'eau de ce puits est alimentée en partie avec celle du canal de Tauran.

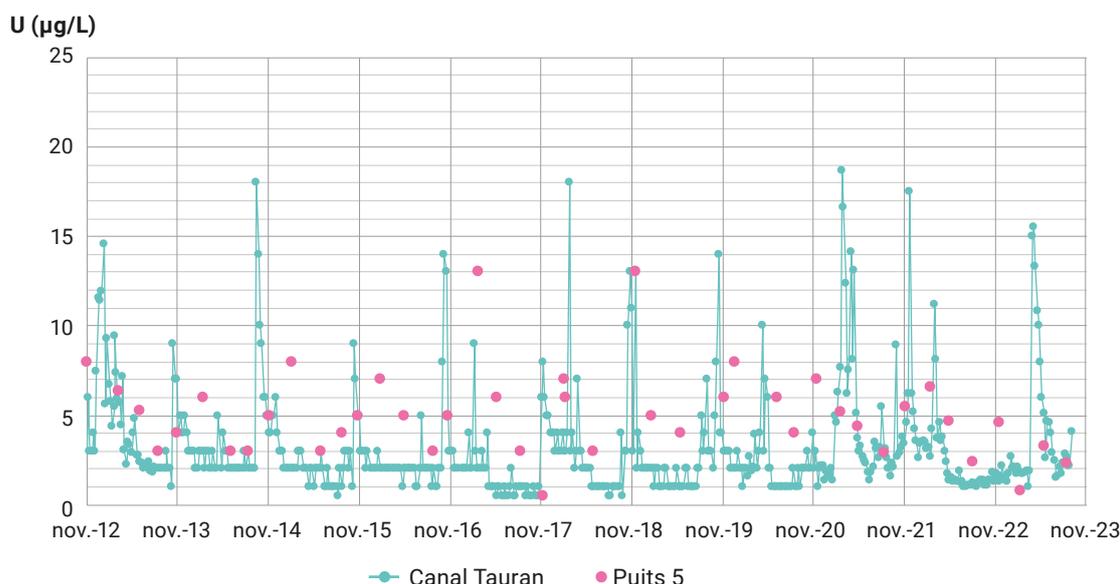
Les activités massiques des isotopes de l'uranium (^{234}U et ^{238}U) dans les moules issues de l'étang de Bages-Sigean (0,16 et 0,14 Bq/kg de matière fraîche, respectivement) sont comparables aux activités de la période d'observation précédente (2018-2020 : 0,20 et 0,18 Bq/kg de matière fraîche, respectivement). Elles sont également proches des activités moyennes mesurées sur les côtes méditerranéennes françaises (moyenne de 12 mesures de l'activité en ^{234}U et ^{238}U réalisées dans le cadre du *Constat radiologique*

Méditerranée⁽²⁾ : 0,19 et 0,16 Bq/kg de matière fraîche, respectivement) et italiennes (moyenne de 15 mesures de ^{234}U et ^{238}U : 0,29 et 0,26 Bq/kg de matière fraîche, respectivement). Ainsi, l'influence du site de Malvési dans l'étang de Bages-Sigean n'est pas décelable au niveau des isotopes majeurs de l'uranium (^{234}U et ^{238}U). Néanmoins près de la moitié des échantillons de moules présente des traces de ^{236}U , isotope de l'uranium d'origine artificielle, témoignant de l'influence d'activités passées du site.

En concordance avec les rejets et 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 la plus influencée par les rejets atmosphériques, située à l'est de l'usine, conduirait à une dose efficace par inhalation de poussières d'uranium de 1 µSv/an. Cette valeur est comparable à celle estimée dans le *Bilan radiologique* précédent (0,8 µSv/an) en raison principalement de rejets atmosphériques d'uranium du site.

(2) *Constat radiologique Méditerranée, rapport IRSN 2020-00895 téléchargeable sur : https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/expertise/rapports_expertise/surveillance-environnement/IRSN_constat-radiologique-mediterranee-20201221-2.pdf*

FIGURE 8 / CONCENTRATION VOLUMIQUE EN URANIUM DANS L'EAU PRÉLEVÉE DANS LE PUIS N° 5 ET DANS LE CANAL DE TAURAN ($\mu\text{g/L}$)



En supposant une consommation quotidienne de 93 g/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 par ingestion des isotopes de l'uranium serait d'environ 0,8 $\mu\text{Sv/an}$. 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 ; 1,7-19 $\mu\text{Sv/an}$ et 0,12-1,3 $\mu\text{Sv/an}$, 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 blé⁽³⁾ produit en bordure du site conduirait à une dose de 0,0008 $\mu\text{Sv/kg}$. 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 0,003 $\mu\text{Sv/L}$.

Enfin, les mesures de débit d'équivalent de dose réalisées à sa clôture, montrent que le site de Malvési est à l'origine d'une augmentation localisée du débit de dose ambiant. Les valeurs enregistrées entre 2021

et 2023 ont peu varié depuis la précédente période d'observation (2018-2020). Les débits de dose les plus élevés sont mesurés en limite nord du site (jusqu'à 757 nSv/h, en moyenne), à proximité immédiate de l'INB ECRIN (578 nSv/h, en moyenne) ainsi que dans une zone accessible au public, située à proximité du parc d'entreposage des fûts de concentrés d'uranium (trois points de mesures, de 284 à 408 nSv/h, en moyenne). Ces valeurs sont nettement supérieures à la moyenne des mesures réalisées par l'IRSN à Narbonne (64 nSv/h). Il est difficile d'imaginer une présence prolongée aux niveaux des points de mesures, même s'ils sont accessibles au public. Ainsi, la présence d'une personne durant une dizaine d'heures à proximité immédiate d'un des points où se trouvent ces dosimètres conduirait à une dose de 3,5 μSv . Des temps de présence plus importants conduiraient bien sûr à des doses plus élevées⁽⁴⁾. Des estimations plus précises et réalistes des doses externes susceptibles d'être reçues par les riverains du site, basées sur une cartographie des débits d'équivalents de dose et la prise en compte de leur mode de vie, sont en cours dans le cadre de l'ERS menée par l'IRSN (focus pp. 108-110). Il apparaît que la dose la plus élevée serait de l'ordre de 100 $\mu\text{Sv/an}$ pour des personnes résidants à proximité du site.

(3) 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. La proportion de l'uranium dans le grain lui-même est de l'ordre de 4 % de l'uranium mesuré dans le blé « brut » (grain avec sa cuticule).

(4) À ce titre, il convient de noter qu'un scénario pénalisant, supposant la présence dans le voisinage immédiat d'un agriculteur à raison de 2000 h/an, conduirait à une dose de l'ordre de 700 $\mu\text{Sv/an}$. Cette estimation peu réaliste mais qui reste envisageable faute d'éléments de scénarios d'expositions complémentaires, reste cependant inférieure à la dose limite d'exposition de la population liée à des activités nucléaires qui est de 1 mSv/an.

ÉTUDE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE ORANO DE MALVÉSI

FOCUS

L'environnement de l'usine de conversion de l'uranium Orano de Malvési, située dans le département de l'Aude, a été choisi par l'IRSN pour réaliser, en complément de la surveillance régulière de l'exploitant et de l'IRSN, une étude radiologique de site⁽¹⁾, dans le but de renforcer

son expertise sur l'influence de l'activité industrielle du site sur son environnement. Prévu sur 4 ans (2021-2024), ce programme d'étude a pour objectifs principaux d'améliorer les connaissances scientifiques sur l'influence de cette usine sur son environnement, d'estimer de manière la plus réaliste possible l'exposition des populations avoisinantes en prenant en compte leurs habitudes de vie, de permettre à la population de s'impliquer dans l'étude et de s'en approprier les concepts, les enjeux et les résultats.

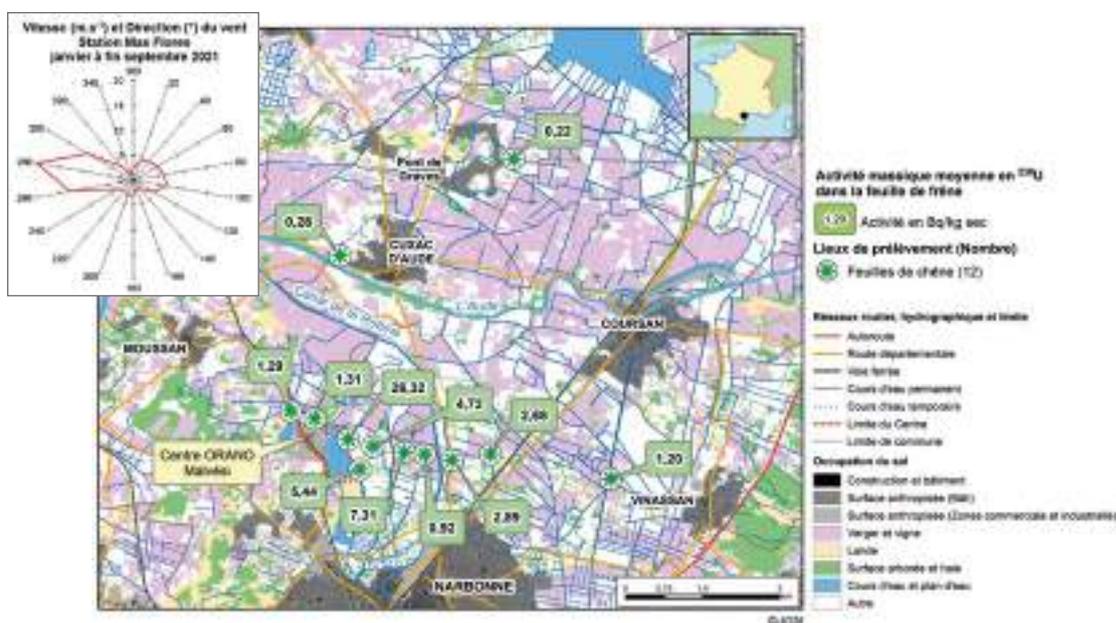
Il est organisé autour de trois axes principaux :

1. L'implication des acteurs locaux et de la population dans le programme d'étude, en apportant notamment leur concours à sa mise en œuvre (réalisation de prélèvements) et en s'appropriant les concepts, les enjeux et les résultats. Les principaux échanges se déroulent au sein des instances locales comme la Commission de suivi de site de Malvési (CSS), l'Observatoire des rejets (groupe de travail de la CSS) et la CLI ECRIN, instances auxquelles siège notamment l'exploitant Orano.
2. Des études de terrain dans les différents compartiments de l'environnement, pour acquérir des mesures à proximité et à distance du site. Ces études complètent la surveillance réglementaire de l'exploitant et celle de routine de l'IRSN par la diversification des matrices prélevées et des radionucléides analysés et concourent ainsi à une évaluation plus réaliste de l'exposition des riverains aux rejets :
 - l'étude du compartiment atmosphérique a pour objectif de quantifier l'uranium ajouté dans l'air par l'usine de Malvési. Dans ce cadre, deux stations de collecte d'aérosols à grand débit ($\approx 330 \text{ m}^3/\text{h}$), fonctionnant 24 h/24, ont été installées à un kilomètre environ à l'est et au sud-est de l'usine, sous les vents dominants. En complément, d'autres prélèvements d'aérosols et des mesures radiologiques ont été réalisés dans Narbonne et dans le village de Cuxac-d'Aude. Ces deux points, situés en dehors de l'influence des rejets du site, permettent de disposer d'activités volumiques en uranium représentatives du niveau de référence local hors influence des rejets atmosphériques du site de Malvési. Aux deux points situés sous l'influence immédiate des rejets de l'usine, les activités volumiques moyennes en uranium-238 (18 et $7 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air à l'est et au sud-est, respectivement) sont plus élevées qu'en dehors de l'influence ($0,8$ et $0,5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air à Narbonne et à Cuxac-d'Aude, respectivement) (cf. paragraphe Malvési) ;
 - les études menées dans le compartiment terrestre ont pour objectif de quantifier l'uranium ajouté par le site dans les végétaux terrestres (feuilles d'arbres et denrées produites localement). Comme pour l'étude atmosphérique, la comparaison des mesures réalisées dans la zone potentiellement influencée par les rejets du site avec celles réalisées « hors influence » permet d'évaluer les activités en uranium ajouté par le site dans les matrices végétales. Dans ce cadre, des feuilles de frênes ont été prélevées en 12 points situés pour l'essentiel à l'est du site, c'est-à-dire sous les vents dominants mais également au nord, en dehors de l'influence des rejets atmosphériques. Ainsi, de fortes variations de l'activité massique en uranium-238 sont observées dans les feuilles d'arbres prélevées dans la zone potentiellement influencée par les rejets (jusqu'à $26 \text{ Bq}/\text{kg sec}$, contre $0,2 \text{ Bq}/\text{kg sec}$, hors influence) (figure 1). Les variations montrent également que la zone influencée

(1) Évolution de la stratégie de surveillance de l'IRSN (cf. page IRSN : <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/environnement/quels-sont-objectifs-etudes-radiologiques-site>). Une première étude a été réalisée dans l'environnement du centre de production d'électricité d'EDF de Saint-Alban – Saint-Maurice (38) entre 2019-2021 (cf. pp. 100-103 et pp. 108-112 du Bilan radiologique 2018-2020).

par les rejets atmosphériques en uranium s'étend jusqu'à environ 2 km sous les vents dominants du point de rejet. La comparaison avec les mesures réalisées en 2007 dans le cadre de l'étude radioécologique menée par l'IRSN montre que l'activité massique des feuilles d'arbres a diminué d'un facteur dix environ, en relation avec la diminution des rejets atmosphériques (cf. paragraphe Malvési).

FIGURE 1 / CARTOGRAPHIE DE L'ACTIVITÉ MASSIQUE EN URANIUM-238 DANS LES FEUILLES DE FRÊNES PRÉLEVÉES EN 2021 DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE ORANO DE MALVÉSI DANS LE CADRE DE L'ERS DE MALVÉSI (Bq/kg sec)



En complément, 24 prélèvements de denrées (blé, légumes feuilles, tomates, figues, raisin et vin) ont été effectués, en collaboration avec les producteurs locaux, à l'est du site industriel, sous les vents dominants, et au nord du site, en dehors de l'influence des rejets. Ainsi, jusqu'à environ 2 km du point de rejet, l'uranium ajouté par le rejet atmosphérique de l'usine a été quantifié dans des échantillons de blé et de légumes feuilles (activité massique en ^{238}U atteint 0,2 et 0,3 Bq/kg de matière fraîche, respectivement). Ces activités en ^{238}U restent cependant dans la gamme des activités mesurées dans le blé (0,08 à 8 Bq/kg de matière fraîche) et les légumes feuilles prélevés dans les zones à haut niveau de radioactivité naturelle⁽²⁾ (0,9 à 3 Bq/kg de matière fraîche). En comparaison de ces deux matrices, l'uranium-238 ajouté par le site dans les autres denrées est très faible (fruits : 0,03 à 0,02 Bq/kg de matière fraîche) ou indétectable (vin).

En parallèle des prélèvements de végétaux, une étude a été menée dans l'environnement terrestre du site dans l'objectif de cartographier le débit d'équivalent de dose gamma ambiant. À cette fin, des mesures *in situ* ont été réalisées en avril 2023 à différentes échelles d'observation, en utilisant des mesures hélicoptérées, des mesures véhiculées « car-borne » et des mesures « à pied ». Il s'agit ainsi d'évaluer les variations du débit de dose apparent liées à la géologie à une large échelle d'observation (50 km² environ) et plus localement, les mesures effectuées au nord du site vont permettre de mieux caractériser l'exposition du public au rayonnement, en fonction du temps passé dans l'environnement très proche du site (influence du parc d'entreposage de concentrat minier).

(2) Les zones à haut niveau de radioactivité naturelle sont définies dans le chapitre 1.

- Les études menées dans les compartiments aquatiques continental et marin ont pour objectif de connaître précisément les activités des radionucléides et des substances chimiques (anions, cations et métaux traces) ajoutés par le site industriel dans le canal de Tauran et vers l'aval, dans le canal de la Robine et l'étang de Bages-Sigean. Pour ce faire, des prélèvements d'eaux de surface, de sédiments, de végétaux aquatiques, de poissons et de mollusques ont été réalisés en octobre et décembre 2023.
- En complément, l'étude des eaux de nappes phréatiques, réalisée en octobre 2023, a pour but de dresser un état des lieux des concentrations des radionucléides naturels et artificiels dans l'eau de trois puits de riverains du site. À la demande de l'Observatoire des rejets, cette étude doit également permettre d'expliquer les activités mesurées en strontium-90 dans le cadre de la surveillance régulière réalisée par l'exploitant en janvier 2020 dans l'eau des puits de plusieurs riverains, destinés à l'irrigation des cultures, l'arrosage des jardins et au lavage des installations d'un domaine viticole.
- 3. Des enquêtes de proximité ont également été menées entre juillet et août 2023 pour actualiser les informations sur les modes de vie des habitants résidant autour du site. Il s'agit de recueillir des informations sur les habitudes alimentaires, notamment leur consommation de produits locaux, et sur la gestion de l'espace-temps, notamment le temps passé en extérieur et en intérieur, à proximité et à distance du site. Cette étude initialement prévue sur les 24 communes comprises dans un périmètre de 10 km autour du site, a finalement été réalisée, suite au faible taux de participation, dans les trois communes situées dans un périmètre de 5 km autour de Malvézi, auprès de 27 foyers qui ont répondu favorablement à cette démarche. Ces informations, complémentaires des études menées dans les différents compartiments de l'environnement, sont indispensables pour réaliser une évaluation dosimétrique plus réaliste de l'exposition des populations locales.

Le rapport de synthèse des études menées dans les compartiments atmosphérique et terrestre ainsi que celui concernant les enquêtes sur les modes de vie des riverains sont disponibles sur le site de l'IRSN. La synthèse concernant les études menées dans les compartiments aquatiques continental et marin, dans les eaux de nappes et la synthèse dosimétrique seront disponibles ultérieurement.



Prélèvements de feuilles de frênes

© Gilles Deschamps/Signatures/Médiathèque IRSN

Le site Orano 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 conversion et de l'enrichissement de l'uranium (figure 1). Orano intervient dans la chimie de l'uranium (défluoruration et dénitration 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.

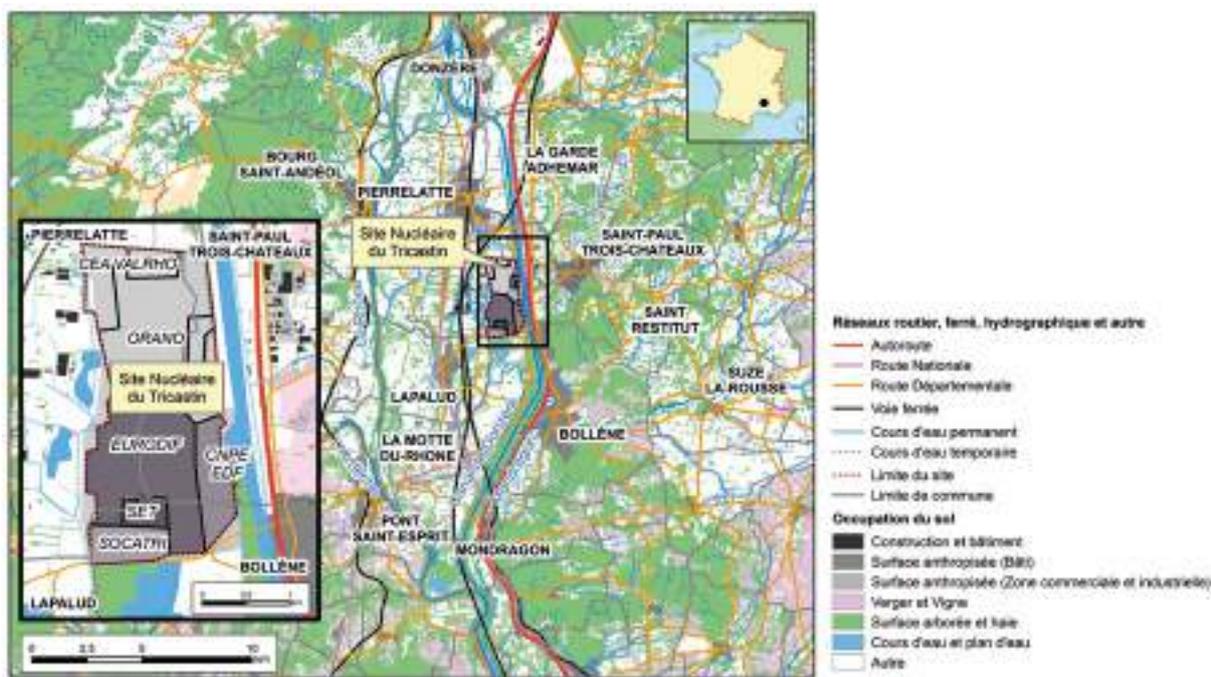
L'enrichissement de l'uranium par centrifugation est assuré par la Société d'enrichissement du Tricastin (INB 168) dans les usines Georges Besse II, alors que l'usine d'enrichissement par diffusion gazeuse « Eurodif » (INB 93) est arrêtée depuis juin 2012. Enfin, l'INB 138 est chargée du traitement des effluents uranifères ainsi que du traitement, de l'entreposage et de l'élimination de déchets radioactifs et conventionnels.

En 2023, le site d'Orano du Tricastin compte neuf installations nucléaires de base (INB) et une INBS (installation nucléaire de base secrète). Il comprend également deux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) classées Seveso.

Les rejets radioactifs du site Orano 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 également rejetés par les installations du site du Tricastin (figures 2 et 3). Le carbone-14 et le tritium sont prépondérants dans les rejets atmosphériques (0,12 et 0,51 GBq/an, respectivement en 2023). Néanmoins, ces valeurs correspondent à des déclarations de seuils de décision (multipliés par les débits de ventilation des cheminées). Ces deux radionucléides seront désormais uniquement déclarés lorsque des opérations de recyclage de matières provenant de réacteurs de la filière à uranium naturel graphite gaz (UNGG) seront réalisées (décision n° 2023-DC-0758 du 11 mai 2023). Les activités en uranium rejetées dans l'air, tous isotopes confondus, ont fortement diminué à partir de 2018. Depuis, elles fluctuent entre 0,008 GBq en 2018 et 0,0003 GBq en 2023 et proviennent principalement de l'usine de conversion. Les rejets de transuraniens (isotopes du plutonium notamment) et de produits de fission sont relativement stables, ils représentent 0,0001 et 0,005 GBq respectivement, en 2023. Les vents dominants de la vallée du Rhône (de secteur N-NE et S-SO à 80 et 15 % respectivement) dispersent les rejets au nord et surtout au sud du site, qui constituent les principales zones influencées par les rejets atmosphériques provenant du site d'Orano du Tricastin.

FIGURE 1 / LOCALISATION DU SITE ORANO DU TRICASTIN



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. Depuis 2010, les rejets dans le compartiment aquatique varient peu au cours du temps. En 2023, les rejets liquides radioactifs du site se composent essentiellement d'isotopes de l'uranium, dont 1,4 GBq/an environ est

rejeté annuellement dans le canal. L'INBS est le principal contributeur à ce rejet d'uranium. Les radionucléides artificiels font également partie des rejets aqueux du site Orano du Tricastin, comme le carbone-14 (0,26 à 0,35 GBq/an), le tritium (0,26 à 0,43 GBq/an), d'autres produits de fission (0,12 à 0,15 GBq/an) et des transuraniens (0,05 à 0,06 GBq/an).

FIGURE 2 / CHRONIQUE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES DES INSTALLATIONS DU SITE ORANO DU TRICASTIN PENDANT LA PÉRIODE 2009-2023 (GBq/an)

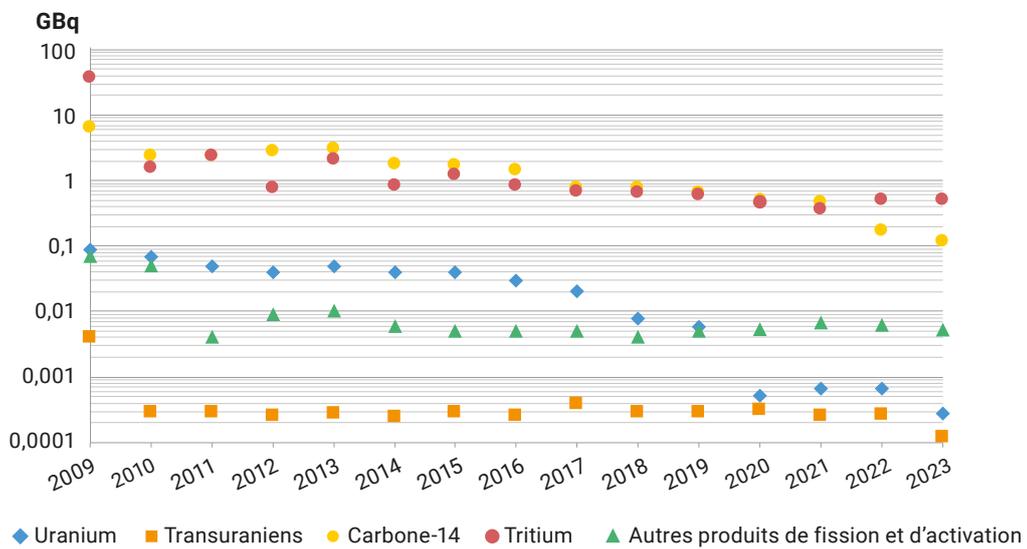
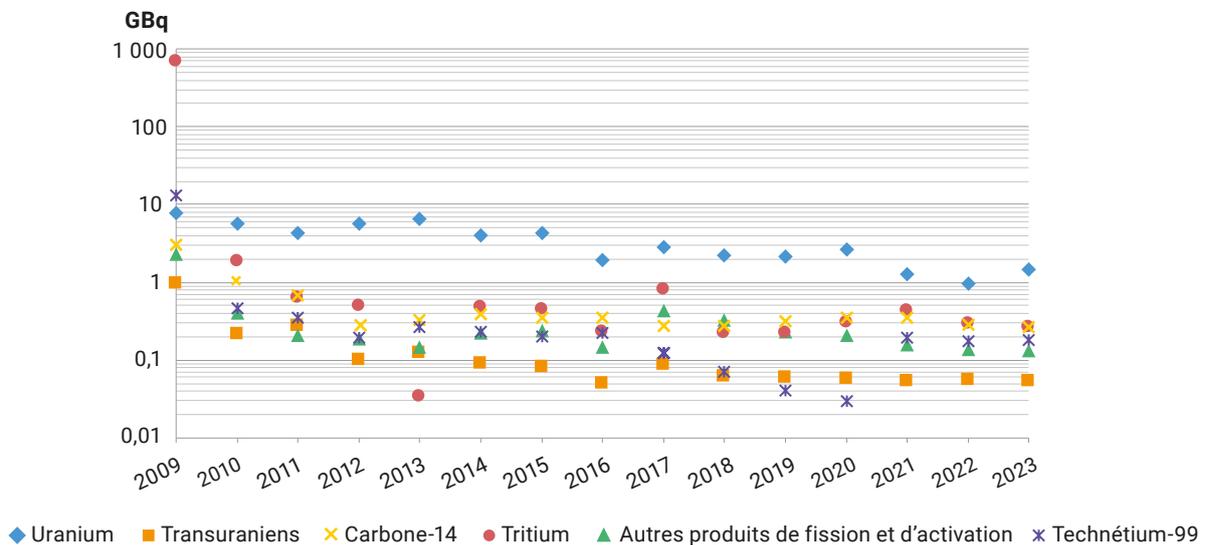


FIGURE 3 / CHRONIQUE DES REJETS AQUATIQUES DES INSTALLATIONS DU SITE ORANO DU TRICASTIN PENDANT LA PÉRIODE 2009-2023 (GBq/an)



La surveillance de l'environnement du site Orano du Tricastin

Pour assurer la surveillance de la radioactivité dans l'environnement du site du Tricastin, Orano s'appuie sur un réseau de prélèvements dans les compartiments aquatique et terrestre : le 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 pour la mesure de la concentration volumique d'uranium et de tritium. Les teneurs en uranium 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, Orano dispose d'un réseau de piézomètres pour assurer la surveillance de l'eau de la nappe phréatique et détecter une éventuelle influence à l'aval hydraulique du site. La surveillance du compartiment 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 prélevées de l'herbe et des denrées agricoles principalement pour la mesure de l'uranium et des transuraniens (tableau 1).

Dans les principaux cours d'eau cités précédemment, l'IRSN réalise également des prélèvements pour détecter une éventuelle influence des installations 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 du canal de Donzère-Mondragon en amont et en aval du site. Dans le compartiment terrestre, la surveillance exercée par l'IRSN repose sur des prélèvements de denrées en différents points, pour la mesure de l'uranium, du tritium et du carbone-14. De plus, depuis 2014, des prélèvements d'aérosols et des mesures des isotopes de l'uranium sont réalisés par l'IRSN au sud-est du site, dans la continuité de l'étude réalisée dans le compartiment atmosphérique en 2012 (tableau 1).

L'influence des installations du site du Tricastin et l'exposition du public

Les isotopes de l'uranium

Les analyses effectuées sur les aérosols prélevés de manière hebdomadaire par l'IRSN entre fin 2020 et juillet 2023 permettent de calculer une activité moyenne en uranium-238 de $0,4 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air, très proche de la valeur moyenne calculée entre 2017 et 2020 ($0,5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Cette activité volumique, plus élevée que le bruit de fond d'uranium hors influence des rejets des installations du cycle du combustible ($0,2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air), ainsi que la proportion de l'uranium-235 et la présence ponctuelle de l'uranium-236 (isotope de l'uranium d'origine artificielle) dans l'air, traduisent l'influence locale des rejets d'uranium des installations d'Orano du Tricastin dans le compartiment atmosphérique. Dans la période d'observation (2021-2023), seules deux mesures de l'activité volumique en uranium-238 dépassent notablement l'activité moyenne de $0,4 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air : en mai 2021 ($4,5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) et mars 2023 ($2,6 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) (figure 4). En comparaison, rappelons que le rejet incidentel d'uranium appauvri de l'installation « W »⁽¹⁾ en octobre 2013 avait induit une activité d'uranium-238 dans l'air supérieure à $100 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

Résider à proximité de la station de prélèvement ou à une distance similaire du site sous les vents dominants conduirait à une dose consécutive à l'inhalation des poussières d'uranium de l'ordre de $0,02 \mu\text{Sv}/\text{an}$; une estimation similaire à celle effectuée pour la période précédente (2018-2020) qui était de $0,03 \mu\text{Sv}/\text{an}$.

Dans l'herbe prélevée par Orano dans le cadre de la surveillance réglementaire, les activités massiques en uranium-238 sont peu variables et sont comprises entre $0,14$ et $0,32 \text{ Bq}/\text{kg sec}$, selon le site de prélèvement (tableau 2). En comparaison de la période 2018-2020, l'activité massique d'uranium-238 dans cette matrice a sensiblement diminué.

(1) L'usine W, située dans le périmètre de l'installation TU5, permet de traiter l'UF6 appauvri, issu de l'usine d'enrichissement Georges Besse II pour le stabiliser en U_3O_8 .

TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DU SITE ORANO DU TRICASTIN

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Orano	IRSN
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> Aspiration en continu en 7 points du site et en 4 points dans l'environnement avec mesures journalières α et β globales (aérosols). Réalisation d'une spectrométrie γ et α si l'activité α globale > 1 mBq/m³ Réalisation d'une spectrométrie γ si l'activité β globale > 2 mBq/m³ Réalisation d'une spectrométrie γ et α mensuelle sur regroupement pour les 4 points de l'environnement Réalisation d'une mesure ³H et ¹⁴C hebdomadaire sur deux points de l'environnement 	<ul style="list-style-type: none"> 1 station de prélèvement en continu d'aérosols avec 1 mesure spectrométrie γ à une fréquence hebdomadaire (localisée au sud du site), uranium
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> 4 points à l'intérieur du site plus 24 points en limite de site et 1 point hors influence 	<ul style="list-style-type: none"> 7 points
Pluie	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement bimensuel avec mesures α et β globales, U pondéral et U isotopique sur regroupement mensuel 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement : 1 mesure mensuelle ³H (localisée au sud du site)
Sédiments dulçaquicoles	<ul style="list-style-type: none"> 5 points de prélèvement avec mesure de la teneur en uranium et spectrométrie γ et pour le point de prélèvement dans le canal de Donzère en aval, mesure de l'uranium isotopique, des transuraniens et des produits de fission 	<ul style="list-style-type: none"> 5 points de prélèvement semestriel avec mesure uranium et spectrométrie γ et pour 2 points de prélèvement, mesure plutonium et américium
Végétaux aquatiques	<ul style="list-style-type: none"> 5 points de prélèvement avec mesure de la teneur en uranium et spectrométrie γ et pour le point de prélèvement dans le canal de Donzère en aval, mesure de l'uranium isotopique, des transuraniens et des produits de fission 	<ul style="list-style-type: none"> 5 points de prélèvement semestriel avec mesure uranium et spectrométrie γ et pour 2 points de prélèvement, mesure TOL et ¹⁴C
Faune aquatique	<ul style="list-style-type: none"> 5 points de prélèvement avec mesure de la teneur en uranium et spectrométrie γ et pour le point de prélèvement dans le canal de Donzère en aval, mesure de l'uranium isotopique, des transuraniens et des produits de fission 	-
Eaux de surface	<ul style="list-style-type: none"> 9 points de prélèvement, d'hebdomadaire à mensuel, avec mesures α et β globales et U pondéral 	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement semestriel avec mesure HTO, uranium et spectrométrie γ et 1 hydrocollecteur avec mesure ³H et uranium
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> 35 points de prélèvement, de mensuel à semestriel, avec mesure de la teneur en uranium 	-
Lait	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement annuel avec mesure spectrométrie γ 	<ul style="list-style-type: none"> 2 prélèvements annuel avec mesure HTO, uranium et spectrométrie γ
Principales productions agricoles	<ul style="list-style-type: none"> 1 campagne annuelle avec mesure de l'uranium, des isotopes de l'uranium, des transuraniens et une spectrométrie γ (⁴⁰K) 	<ul style="list-style-type: none"> 3 prélèvements avec mesure du HTO et TOL, du ¹⁴C, de l'uranium et spectrométrie γ
Herbes	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement mensuel avec mesure de la teneur en uranium, des isotopes de l'uranium et des transuraniens et spectrométrie γ (⁴⁰K) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement avec mesure du HTO et TOL, de l'uranium et spectrométrie γ
Céréales	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement annuel avec mesure spectrométrie γ et uranium
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement annuel avec mesure de la teneur en uranium, des isotopes de l'uranium et des transuraniens et spectrométrie γ (⁴⁰K) 	-

FIGURE 4 / ACTIVITÉ VOLUMIQUE D'URANIUM-238 DANS L'AIR PRÉLEVÉ AU SUD DU SITE ORANO DU TRICASTIN DEPUIS 2012 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)

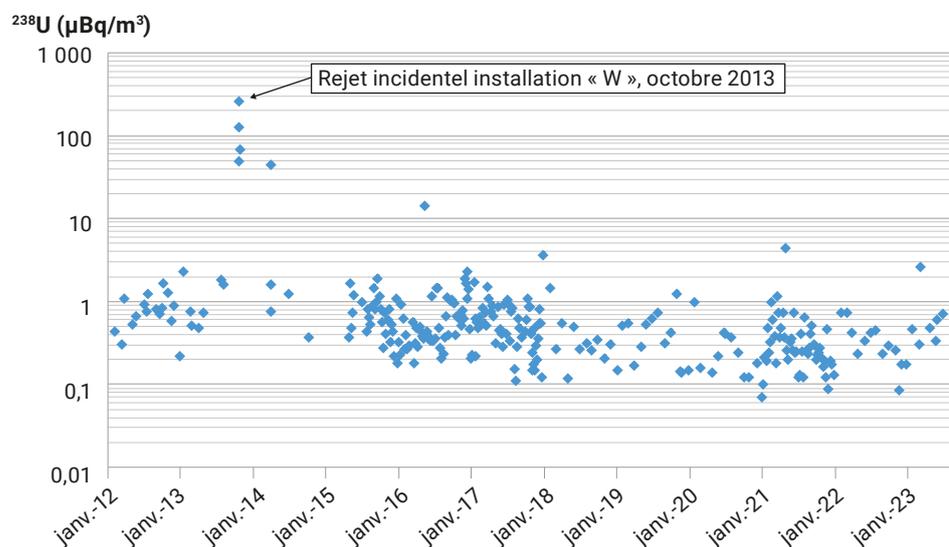


TABLEAU 2 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES D'URANIUM-238 DANS L'HERBE PRÉLEVÉE DANS LE RÉSEAU DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT (Bq/kg sec)

	Uranium-238			
	2011-2014	2015-2017	2018-2020	2021-2023
ID1 - Favayrolles	0,14	0,35	0,32	0,27
ID2 - Prés Guérinés	0,20	0,50	0,44	0,32
ID3 - Bollène-La Croisière	0,24	0,52	0,65	0,24
ID4 - Lapalud	0,11	0,32	0,29	0,14

Dans le cours d'eau de la Gaffière, une concentration volumique moyenne légèrement plus élevée est observée à l'aval du site (1,8 $\mu\text{g}/\text{L}$ soit une activité volumique moyenne en uranium-238 de 0,02 Bq/L) en comparaison de celle à l'amont (1,2 $\mu\text{g}/\text{L}$ en moyenne) (figure 5).

Parmi les eaux de surface surveillées, les eaux du lac Trop-Long (ancienne gravière correspondant à un mélange d'eaux de surface et d'eaux souterraines), sont les plus marquées par l'uranium (2,8 $\mu\text{g}/\text{L}$ en moyenne sur la période 2021-2023, correspondant à une activité volumique moyenne en uranium-238 de 0,03 Bq/L). Les concentrations volumiques observées dans ces eaux de surface sont proches de celles de la période 2018-2020.

Une activité moyenne d'uranium-238 un peu plus élevée est observée dans les sédiments de la Gaffière en aval du site Orano (activité moyenne d'uranium-238 de 27 Bq/kg sec dans les sédiments) en comparaison de celle en amont (activité moyenne d'uranium-238 de 20 Bq/kg sec dans les sédiments) (tableau 3). En comparaison des sédiments, l'activité d'uranium-238 des végétaux aquatiques est plus homogène et aucun marquage d'uranium de cette matrice n'est observé à l'aval du site (tableau 4). Cependant, dans les sédiments et les végétaux prélevés dans la Gaffière à l'aval du site, des traces d'uranium-236, isotope de l'uranium d'origine artificielle, sont mesurées. L'ensemble des mesures réalisées dans la Gaffière permet donc de conclure au marquage des eaux de surface, des végétaux aquatiques et des sédiments

FIGURE 5 / CONCENTRATION VOLUMIQUE D'URANIUM DANS LES EAUX DE SURFACE PRÉLEVÉES DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE ORANO DU TRICASTIN DEPUIS 2013 (µg/L)

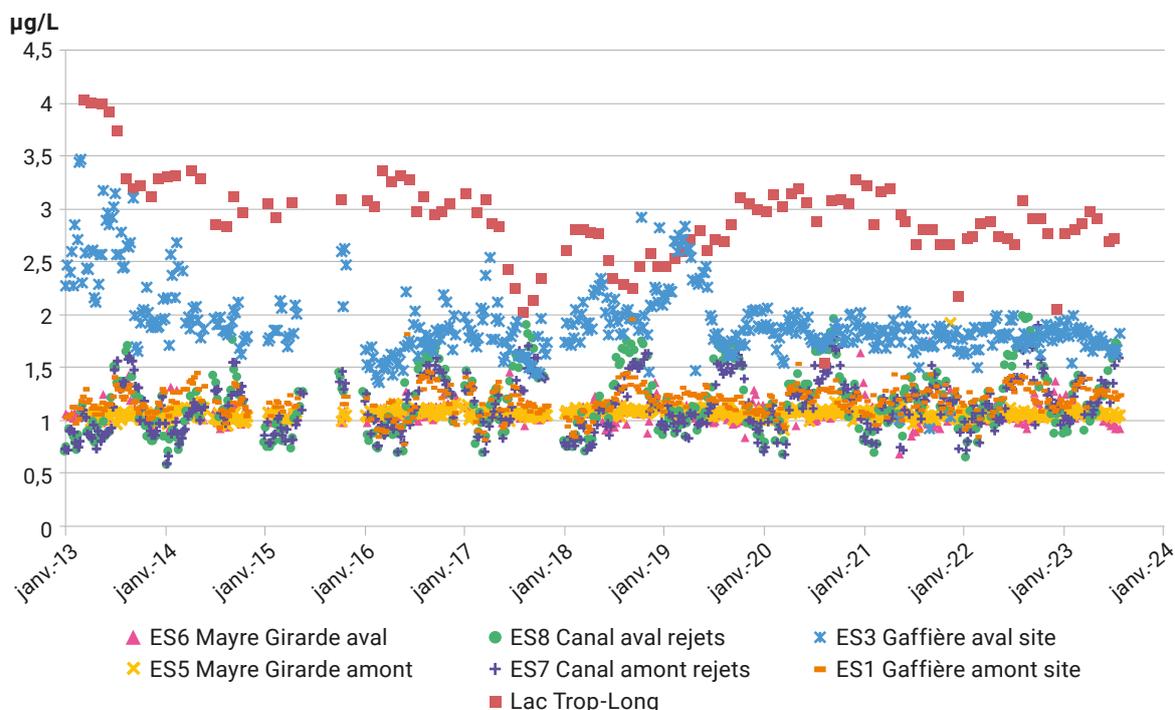


TABLEAU 3 / ACTIVITÉS MASSIQUES DES ISOTOPES DE L'URANIUM ET DES TRANSURANIENS DANS LES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS DANS L'ENVIRONNEMENT AQUATIQUE DU SITE ORANO DU TRICASTIN ENTRE 2021 ET 2023 (Bq/kg sec)

	Uranium-234	Uranium-235	Uranium-238	Plutonium-239+240	Américium-241
Canal de Donzère-Mondragon, amont rejets	33	1,5	33	0,1	< 0,3
Canal de Donzère-Mondragon, aval rejets	32	1,5	33	0,1	< 0,3
Gaffière, amont rejets	20	0,9	20	< 0,13	< 0,4
Gaffière, aval rejets	29	1,2	27	< 0,08	< 0,4
Lauzon	20	0,9	20	-	< 0,4

TABLEAU 4 / ACTIVITÉS MASSIQUES DES ISOTOPES DE L'URANIUM DANS LES VÉGÉTAUX AQUATIQUES PRÉLEVÉS DANS L'ENVIRONNEMENT AQUATIQUE DU SITE ORANO DU TRICASTIN ENTRE 2021 ET 2023 (Bq/kg sec)

	Uranium-234	Uranium-235	Uranium-238
Canal de Donzère - amont CNPE	7,2	0,3	6,8
Canal de Donzère - aval CNPE	8,4	0,4	8,3
Gaffière - amont CNPE	13	0,6	12
Gaffière - aval CNPE	12	0,5	11
Lauzon	12	0,5	10

par l'uranium provenant du site. Le marquage des sédiments à l'aval du site est cependant très faible au regard de l'activité moyenne en uranium-238 des sédiments en France mesurés par l'IRSN, de l'ordre de 40 Bq/kg sec. 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 très faible dose due à l'uranium de l'ordre de 0,0034 µSv.

Les prélèvements et les analyses de l'eau du canal de Donzère-Mondragon ne font pas apparaître de différence significative entre la concentration volumique d'uranium à l'amont du rejet et celle en aval (en moyenne 1,18 et 1,22 µg/L, respectivement) (figure 5). De même, peu de variations sont observées entre les périodes d'observations 2018-2020 et 2021-2023. Il en est de même pour les sédiments et les végétaux aquatiques prélevés à l'aval des rejets dans le canal de Donzère-Mondragon qui ne révèlent aucun marquage en uranium et en transuraniens (tableaux 2 et 3).

En comparaison des eaux de surface, les eaux de la nappe alluviale prélevées dans le voisinage immédiat du site Orano du Tricastin témoignent d'une concentration volumique moyenne en uranium très homogène, de l'ordre de 1,2 µg/L (figure 6).

En quelques points situés majoritairement au sud du site, le marquage en uranium de la nappe alluviale, caractérisé en 2012 par l'IRSN, perdure aujourd'hui, comme au Mas de Flore où la concentration volumique moyenne est stable (12 µg/L).

Le tritium et le carbone-14

Les activités de carbone-14 dans les poissons prélevés dans le Rhône à Mornas, situé à l'aval du site du Tricastin, en 2021 et 2022 (93,9 et de 41,9 à 154 Bq/kg frais, respectivement) sont supérieures au bruit de fond dans le milieu aquatique, de l'ordre de 25 Bq/kg frais. Rappelons que les poissons et mollusques du Rhône, influencés par les rejets de carbone-14 des CNPE implantées le long du fleuve, témoignent d'une activité croissante de ce radionucléide vers l'aval, avec une activité maximale de 235 Bq/kg frais pour la période 2021-2023 (chapitre 2.1). Ainsi, la mesure dans les poissons provenant de Mornas ne permet pas de discriminer la part du carbone-14 attribuable aux installations nucléaires du Tricastin, d'autant que les rejets d'Orano du Tricastin pour ce radionucléide (0,26 GBq/an en 2023) sont plus de 200 fois plus faibles que ceux du CNPE du Tricastin (63,8 GBq/an).

FIGURE 6 / CARTOGRAPHIE DE LA CONCENTRATION VOLUMIQUE MOYENNE D'URANIUM DANS LES EAUX DE LA NAPPE PRÉLEVÉES DANS LES DIFFÉRENTS PIÉZOMÈTRES DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE ORANO DU TRICASTIN ENTRE 2021 ET 2023 (µg/L)



© Geneviève Baumont/Médiathèque IRSN



Concentration volumique moyenne en uranium dans l'eau de nappe 2021-2023

ET 01 : Nom du prélèvement
 1,1 : Concentration en µg/L

Lieux de prélèvement (Nom/No)

□ Eau de nappe (0)

Réseau routier, ferré, hydrographique et autre

- Autosole
- Roads départementales
- Voie ferrée
- Cours d'eau permanent
- Cours d'eau temporaire

Occupation du sol

- Construction et bâtiment
- Surface anthropisée (BUI)
- Surface anthropisée (Zones commerciales et industrielles)
- Végétal et vigne
- Surface arborée et haie
- Cours d'eau et plan d'eau
- Autre

Dans le compartiment terrestre, le marquage des végétaux par le carbone-14, extrêmement discret et limité à l'environnement proche du site, n'est visible qu'au travers d'un indicateur très sensible : l'activité par unité de masse de carbone (Bq/kg de C). Elle est en moyenne de 243 Bq/kg de C en 2021-2023 dans l'herbe prélevée sous l'influence des rejets, soit supérieure à la valeur moyenne observée en France en dehors de l'influence des rejets d'une installation nucléaires, qui est de l'ordre de 222 Bq/kg de C. S'il n'est pas possible de discriminer la part de cette activité ajoutée imputable aux rejets d'Orano, il faut noter que ceux-ci, d'une valeur de 0,12 GBq/an en 2023, sont plus de 4 000 fois inférieurs à ceux du CNPE d'EDF voisin (516 GBq/an).

Cette prédominance de l'influence des rejets du CNPE d'EDF sur les activités environnementales mesurées est encore plus sensible pour le tritium. Ainsi, les mesures de l'activité de tritium dans les eaux du canal de Donzère-Mondragon effectuées par Orano et l'IRSN entre 2021 et 2023 donnent des activités moyennes très proches l'une de l'autre : 5,7 et 6,4 Bq/L, respectivement (figure 7). Ces activités volumiques, légèrement plus élevées que celles mesurées entre 2018 et 2020 par Orano et l'IRSN (4,7 et 5,2 Bq/L, respectivement), sont principalement dues aux rejets d'EDF (chapitre 2.1). En effet, les rejets de tritium d'Orano (0,26 GBq/an en 2023) sont infimes au regard des rejets du seul CNPE d'EDF voisin (37 500 GBq en 2022). De plus, les CNPE situées en amont constituent d'autres sources de ce radionucléide très mobile mesuré dans l'eau.

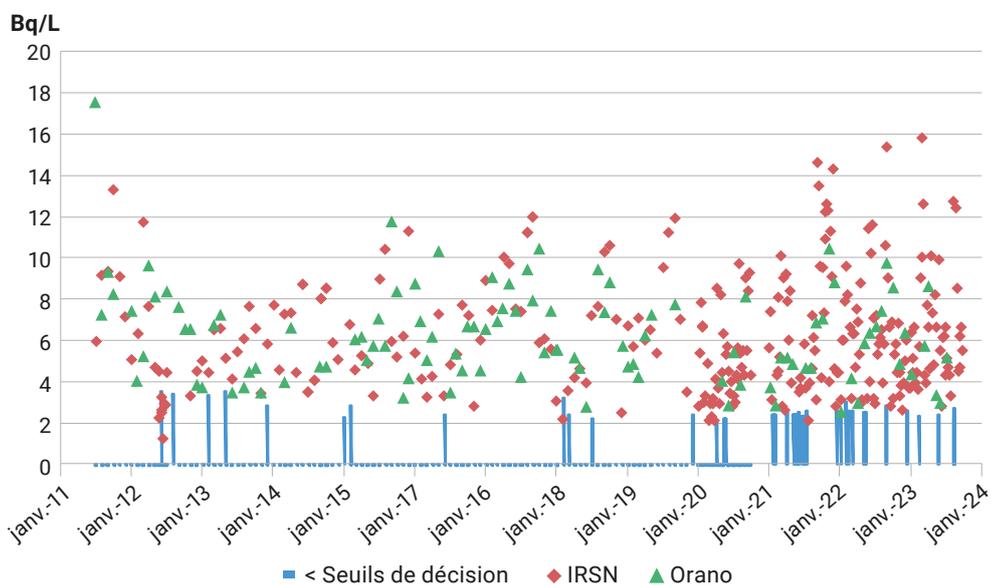
L'activité de tritium dans les denrées terrestres est faible (entre 2,6 et 6,1 Bq/L dans le lait de chèvre provenant de Mondragon et entre 2 et 2,8 Bq/L d'eau de combustion de tritium organiquement lié dans les salades de Bollène-la-Croisière), bien que supérieure à la valeur moyenne du bruit de fond de tritium (hors de l'influence des rejets des installations nucléaires) qui est de 0,8 Bq/L sur la période 2021-2023. En tout état de cause, les faibles activités de tritium mesurées dans l'environnement du complexe du Tricastin sont principalement liées aux rejets du CNPE.

Conclusion

L'influence des rejets radioactifs du site Orano du Tricastin, perceptible au travers des mesures environnementales, est faible et se limite essentiellement à l'uranium dans l'air ainsi que dans le cours d'eau de la Gaffière. Les activités mesurées dans l'air pourraient conduire à une dose par inhalation de l'ordre de 0,02 μ Sv/an. En raison des rejets du CNPE d'EDF implanté sur le site, l'influence des rejets atmosphériques de carbone-14 et de tritium d'Orano, ne peut être discernée dans les résultats des mesures environnementales.

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

FIGURE 7 / ACTIVITÉ VOLUMIQUE DE TRITIUM DANS L'EAU DU CANAL DE DONZÈRE-MONDRAGON, À L'AVAL DES REJETS DU SITE ORANO DU TRICASTIN ENTRE 2011 ET 2023 (Bq/L)



Le site de Romans-sur-Isère

Localisé dans la vallée de l'Isère, le site Framatome de Romans-sur-Isère comporte une installation nucléaire de base INB 63 – U (figure 1). Cette installation est spécialisée dans la fabrication d'éléments de combustible pour les réacteurs de recherche et la fabrication des combustibles nucléaires destinés aux réacteurs à eau pressurisée.

Rejets et plan de surveillance

Les effluents aqueux 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 appelée Neptune. À l'issue du traitement des eaux, les principaux radionucléides rejetés dans l'Isère sont les isotopes de l'uranium (environ 0,1 GBq/an) et, dans une moindre mesure, des produits de fission et des transuraniens (figure 2). Ces radionucléides sont également rejetés dans l'atmosphère par les cheminées des installations (figure 3). Les activités des isotopes de l'uranium rejetées dans l'atmosphère ont fortement diminué et atteignent 0,00003 GBq/an depuis 2020.

Le plan de surveillance mis en place par Framatome a pour objectif de mesurer ces radionucléides dans

les différentes matrices de l'environnement terrestre et aquatique (tableau 1). Ainsi, dans le compartiment aquatique, des prélèvements d'eau de surface, de sédiments, de mousses, de roseaux et de poissons sont réalisés dans l'Isère, en amont et en aval des rejets (figure 1). Dans le compartiment 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, pour évaluer les conséquences des rejets atmosphériques à proximité des installations. Enfin, l'eau de la nappe phréatique est mesurée en 10 points de prélèvement situés dans l'environnement du site Framatome.

Pour l'essentiel, l'IRSN réalise des prélèvements d'aérosols sur le site, complétés par des prélèvements de végétaux terrestres et de lait (tableau 1). Des prélèvements sont également réalisés dans le compartiment aquatique (eaux, sédiments, végétaux et poissons).

En septembre 2022, un incendie s'est déclaré dans un atelier contenant de l'uranium, sans conséquence sur l'environnement. Cet événement est traité au chapitre 4.3 relatif aux éléments d'actualité.

FIGURE 1 / LOCALISATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT DANS L'ENVIRONNEMENT DE L'USINE DE ROMANS-SUR-ISÈRE

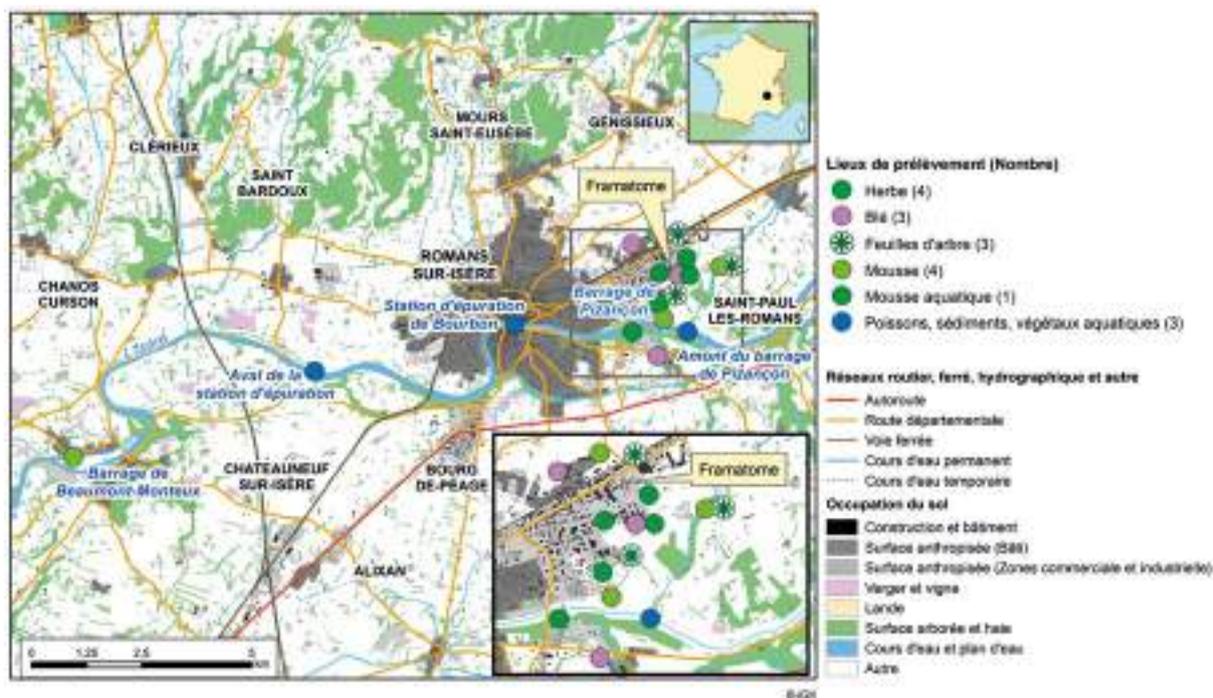


FIGURE 2 / CHRONIQUE DES REJETS LIQUIDES DU SITE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE (GBq/an)

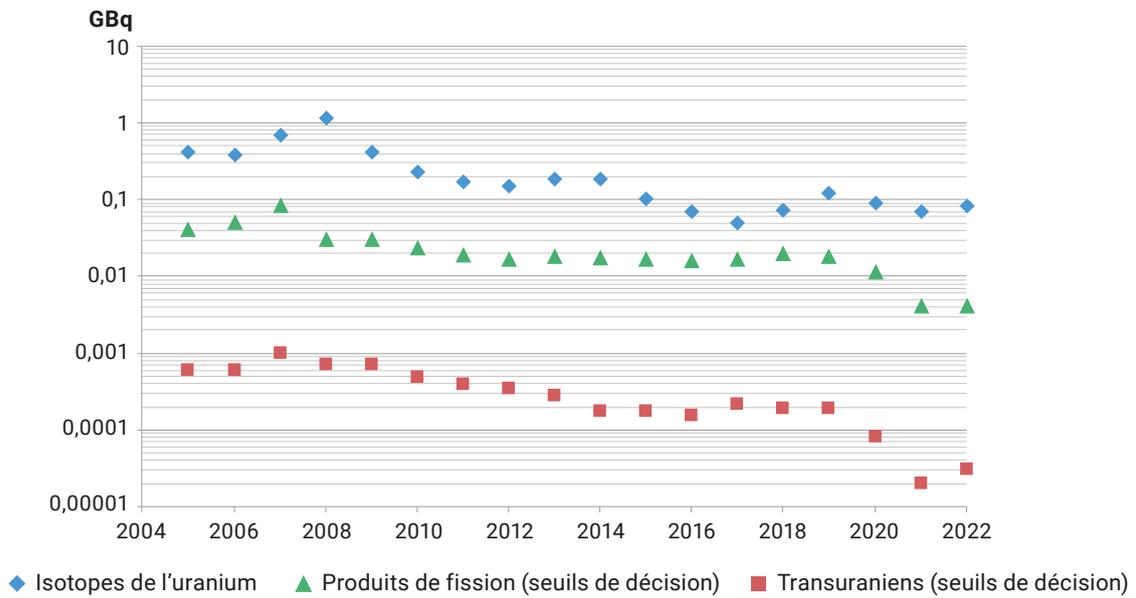


FIGURE 3 / CHRONIQUE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES DU SITE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE (GBq/an)

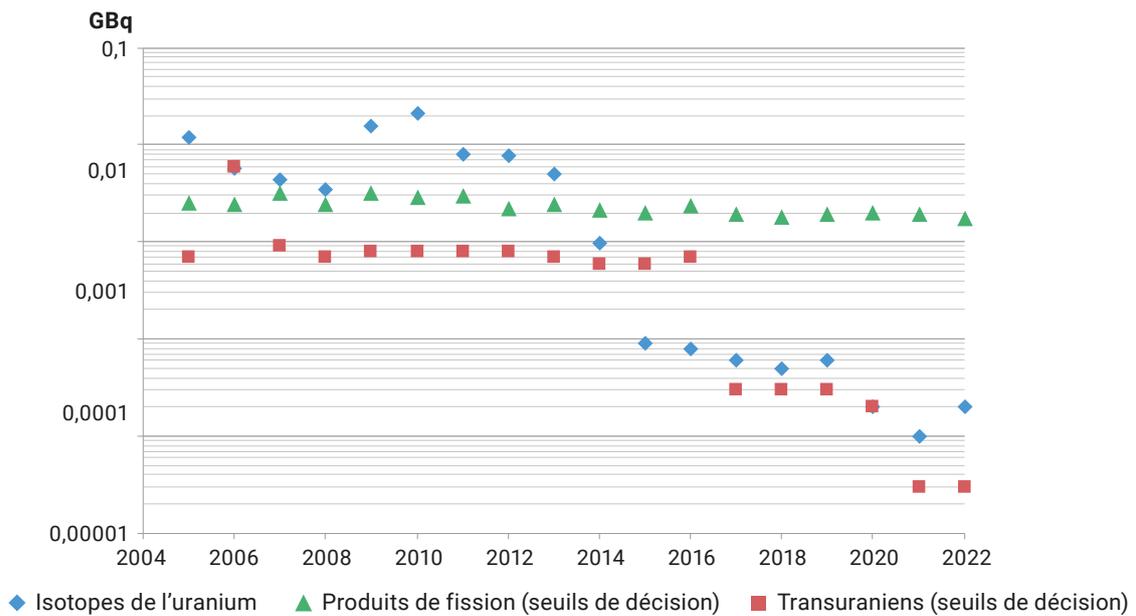


TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT RÉALISÉS PAR FRAMATOME ET L'IRSN

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Framatome			IRSN		
	Fréquence annuelle	Nombre de points de prélèvement	Analyses	Fréquence annuelle	Nombre de points de prélèvement	Analyses
Rayonnement	12	11	DeD			
Aérosols	365	4	AG, BG	52	1	Gamma, U isotop.
Dépôt sec	12	1	AG, BG, U pond.			
Eau de cours d'eau	12	5	AG, BG, U pond.	2	2	U
Eau de nappe	12	4	U pond.			
Eau de pluie	12	1	AG, BG, U pond.	12	1	Gamma, U isotop.
Faune aquatique	1	4	Gamma, U isotop., TU	1	1	Gamma, U isotop.
Lait	1	1	BG, gamma, U pond.	2	1	Gamma, Sr, U isotop.
Productions agricoles	1		BG, gamma, U pond.	2	2	Gamma, U isotop.
Sédiments	1	4	Gamma, U isotop., TU	2	2	Gamma, U isotop.
Sol	1	1	BG, gamma, U pond.			
Végétaux aquatiques	1	4	Gamma, U isotop., TU	2	2	Gamma, U isotop.
Végétaux terrestres	12	4	BG, gamma, U pond.	1	1	Gamma, U isotop.

AG : alpha global - BG : bêta global - DeD : débit de dose gamma ambient - Sr : strontium - TU : transuraniens
 U : uranium - U pond. : uranium pondéral - U isotop. : uranium isotopique.

L'influence du site de Romans-sur-Isère sur son environnement et exposition du public

Les rejets des isotopes de l'uranium dans l'air contribuent à une légère augmentation des activités des aérosols atmosphériques. Ainsi, l'activité moyenne des isotopes de l'uranium observée dans les aérosols prélevés sur le site est relativement homogène, comprise entre 0,01 et 0,02 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air et entre 0,18 et 0,28 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air pour l'uranium-235 et l'uranium-238, respectivement (tableau 2). Lors des périodes précédentes, les activités en uranium-238 étaient plus élevées : de 1,5 à 2,1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air (en 2011-2014), de 0,9 à 1,1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air (en 2015-2017) et de 0,25 à 0,38 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air (en 2018-2020). Ainsi, la diminution de l'activité volumique dans l'air est liée à la baisse des rejets cumulés annuels (figure 3).

Comparées au niveau de l'activité en uranium-238 observé en France en dehors de l'influence des installations du cycle du combustible (de l'ordre de 0,2 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ en uranium-238), ces observations montrent que les activités volumiques de ce radionucléide dans l'air se rapprochent progressivement du fond radiologique.

Dans la même période d'observation (2021-2023), l'activité volumique en uranium-238 dans l'air mesurée

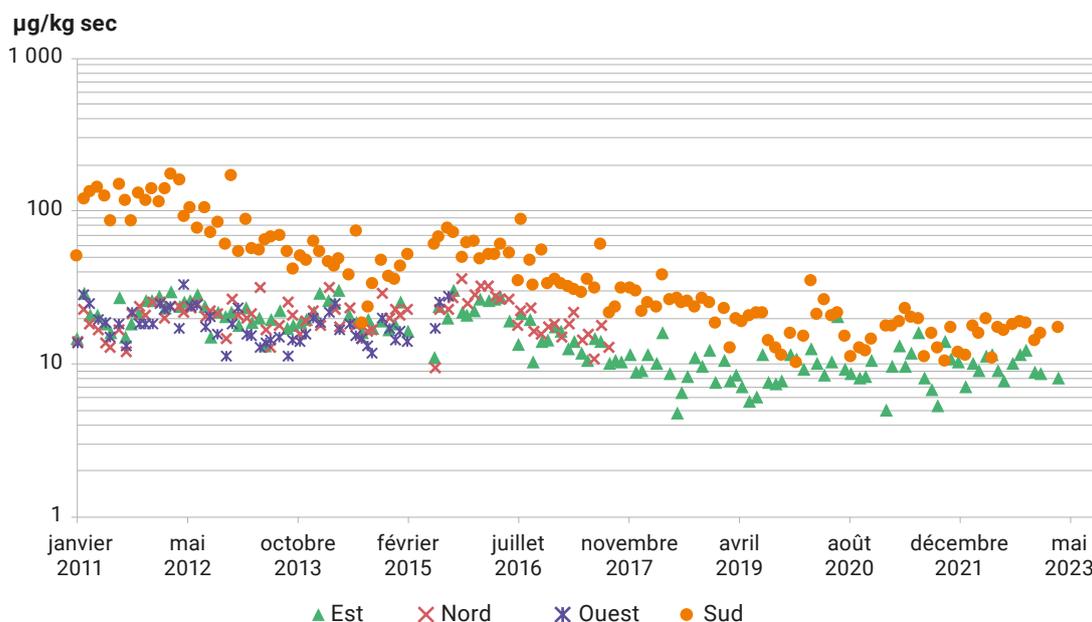
par l'IRSN au sud du site est un peu plus élevée (moyenne : 0,6 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air) et également plus variable (0,1 à 2,3 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air) que celle de l'exploitant. Cette différence est liée au mode de prélèvement spécifique de l'IRSN sur des périodes plus courtes (prélèvements hebdomadaires) et des débits de pompages plus élevés (80 m^3/heure). Par ailleurs, la mise en œuvre de mesures « bas niveau » permet de quantifier l'uranium-236 (isotope artificiel), à l'état de trace dans l'air (en moyenne, 0,003 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air).

Les activités en uranium mesurées dans les aiguilles de pin proviennent du dépôt de ces aérosols atmosphériques marqués par les rejets du site. La concentration massique en uranium la plus élevée est mesurée à l'intérieur du site dans la partie sud avec une concentration moyenne de 16 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$ (figure 4). En comparaison, la concentration massique moyenne en uranium est plus faible à l'est du site (9,7 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$). Ces activités massiques sont proches de celles observées au cours de la période précédente (2018-2021) et qui étaient de 20 et 9,4 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$ dans les feuilles prélevées au sud et à l'est du site, respectivement. Comme pour les aérosols présentés auparavant, la diminution des niveaux d'activités observée dans les feuilles d'arbres du site provient vraisemblablement de la baisse des activités en uranium rejetées dans l'atmosphère.

TABLEAU 2 / ACTIVITÉS MOYENNES DES ISOTOPES DE L'URANIUM DANS LES AÉROSOLS PRÉLEVÉS SUR LE SITE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE ENTRE 2011 ET 2023 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)

	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U
Est	0,85	0,02	0,024	0,20
Nord	< 0,78	0,01	< 0,008	0,18
Ouest	0,90	0,02	0,013	0,28
Sud	0,97	0,02	0,007	0,27

FIGURE 4 / CONCENTRATION PONDÉRALE EN URANIUM DANS LES AIGUILLES DE PIN PRÉLEVÉES SUR LE SITE DE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE, ENTRE 2011 ET 2023 ($\mu\text{g}/\text{kg sec}$)



Dans l'environnement du site, la concentration moyenne en uranium varie en fonction de la nature des végétaux prélevés ainsi que de la localisation des prélèvements par rapport au site (tableau 3). Ainsi, dans l'herbe, la concentration massique en uranium est en moyenne plus élevée à l'est ($12 \mu\text{g}/\text{kg sec}$) en comparaison de l'ouest ($5,6 \mu\text{g}/\text{kg sec}$), du nord et du sud ($5,3$ et $5,5 \mu\text{g}/\text{kg sec}$, respectivement). Dans les mousses terrestres prélevées entre 750 m et 1 250 m de distance du site, la concentration massique moyenne de l'uranium est plus élevée que dans l'herbe, mais également plus homogène (66 à $84 \mu\text{g}/\text{kg sec}$).

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 volumiques

moyennes sont identiques à l'amont et à l'aval ($1,8 \mu\text{g}/\text{L}$). Dans les échantillons de la nappe phréatique (10 points de prélèvement), la concentration volumique en uranium est inférieure au seuil de décision ($< 0,4$ à $< 1 \mu\text{g}/\text{L}$).

Les analyses des isotopes de l'uranium effectuées dans les matrices prélevées dans l'Isère (sédiments, mousses et poissons) 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 (tableau 4). Ainsi, dans ces matrices, les activités de chaque isotope de l'uranium (uranium-234, uranium-235 et uranium-238) à l'amont et à l'aval sont très proches l'une de l'autre (uranium-238 dans les sédiments : 36 et $29 \text{ Bq}/\text{kg sec}$, respectivement).

En conséquence des activités environnementales mesurées, les isotopes de l'uranium constituent 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 conduit à une dose maximale consécutive à l'inhalation des poussières d'uranium de 0,04 µSv/an. Malgré la baisse

des rejets d'uranium, cette valeur, évaluée sur la base des activités mesurées sur les prélèvements d'air effectués par l'IRSN au sud du site, est supérieure à celle qui a été estimée lors de la précédente période d'observation sur la base des activités mesurées sur le site par l'exploitant (2018-2020 : 0,03 µSv/an).

TABLEAU 3 / CONCENTRATION EN URANIUM PONDÉRAL DANS LES VÉGÉTAUX PRÉLEVÉS DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE ENTRE 2011 ET 2023 (µg/kg sec)

	Localisation des prélèvements	Nord	Est	Sud	Ouest
Herbe	Distance site (m)	200	200	750	1 200
	Uranium (µg/kg sec)	5,3	12	5,5	5,6
Mousses terrestres	Distance site (m)	750	1 000	1 250	
	Uranium (µg/kg sec)	84	66	75	
Blé	Distance site (m)		200	2 000	
	Uranium (µg/kg sec)		3,7	2,6	

TABLEAU 4 / ACTIVITÉ MOYENNE DES ISOTOPES DE L'URANIUM MESURÉE DANS LES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS DANS L'ISÈRE EN AMONT ET EN AVAL DE L'ÉMISSAIRE DES REJETS DU SITE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE ENTRE 2020 ET 2023

		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	<0,03		<0,03	<0,03	
	²³⁵ U	0,0006		0,0007	0,0009	
	²³⁶ U	< 0,003		< 0,003	< 0,003	
	²³⁸ U	0,011		0,015	0,018	
Mousses aquatiques (Bq/kg frais)	²³⁴ U		8,2			6
	²³⁵ U		0,4			0,2
	²³⁶ U		< 0,006			< 0,007
	²³⁸ U		8,7			5,8
Sédiment (Bq/kg sec)	²³⁴ U	37		30		
	²³⁵ U	1,6		1,3		
	²³⁶ U	< 0,002		< 0,002		
	²³⁸ U	36		29		
Poissons (Bq/kg frais)	²³⁴ U	< 0,005		< 0,005	< 0,009	
	²³⁵ U	0,00007		0,0001	0,0001	
	²³⁶ U	< 0,0005		< 0,0006	< 0,0008	
	²³⁸ U	0,001		0,002	0,001	

Le site de La Hague

Les installations du site d'Orano Recyclage de La Hague (anciennement Areva NC puis Orano Cycle), ci-après dénommé « site d'Orano La Hague », assurent la première étape du retraitement des combustibles usés provenant de l'exploitation des réacteurs nucléaires. Le site jouxte le centre de stockage de déchets radioactifs de la Manche (CSM) exploité par l'Andra, qui, entre 1969 et 1994, a accueilli près de 530 000 m³ de déchets faiblement et moyennement radioactifs (figure 1). Il a ensuite été fermé et doté d'une couverture. Aujourd'hui, le CSM ne reçoit plus de colis de déchets et est rentré, du fait de la publication du décret n° 2016-846 du 28 juin 2016, dans une phase de surveillance post-fermeture.

Étant donné la proximité de ces deux sites, les résultats de leur surveillance sont restitués 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 site Orano La Hague. Les activités rejetées annuellement sont assez constantes 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 $\beta\gamma$, parmi lesquels figurent notamment le ruthénium-106 et l'antimoine-125, sont rejetés dans des proportions beaucoup plus faibles, qui ne permettent pas leur quantification. Les valeurs indiquées dans les figures 2 et 3 pour les émetteurs $\beta\gamma$ et α correspondent à des sommes de seuils de décisions.

Pour la voie liquide, le tritium prédomine très largement parmi les radionucléides rejetés, suivi dans une moindre mesure par le carbone-14 et les isotopes de l'iode, en particulier l'iode-129 dans les mêmes proportions que pour les rejets gazeux (figure 3). Les effluents liquides sont rejetés en mer via une conduite dont l'émissaire débouche au large du nez de Jobourg.

FIGURE 1 / PHOTO AÉRIENNE DE L'USINE DE RETRAITEMENT D'ORANO RECYCLAGE DE LA HAGUE ET DU CENTRE DE STOCKAGE DE LA MANCHE



Centre de stockage
de la Manche

Usine de retraitement
Orano La Hague

© Andra

FIGURE 2 / BILAN DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES DES INSTALLATIONS D'ORANO RECYCLAGE DE LA HAGUE (TBq/an)

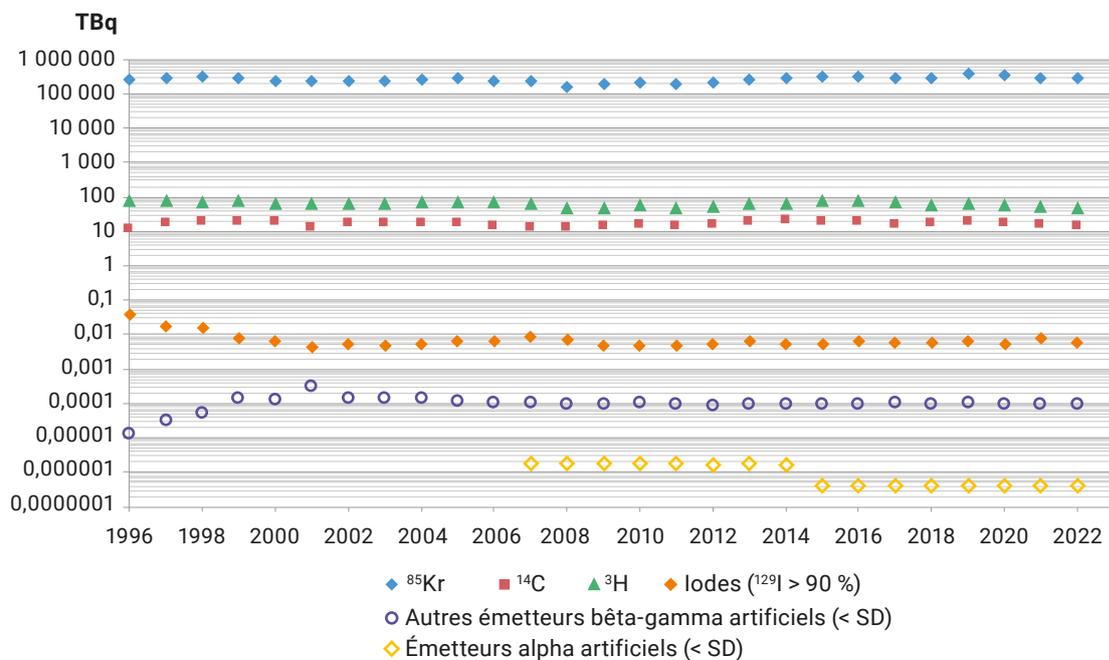
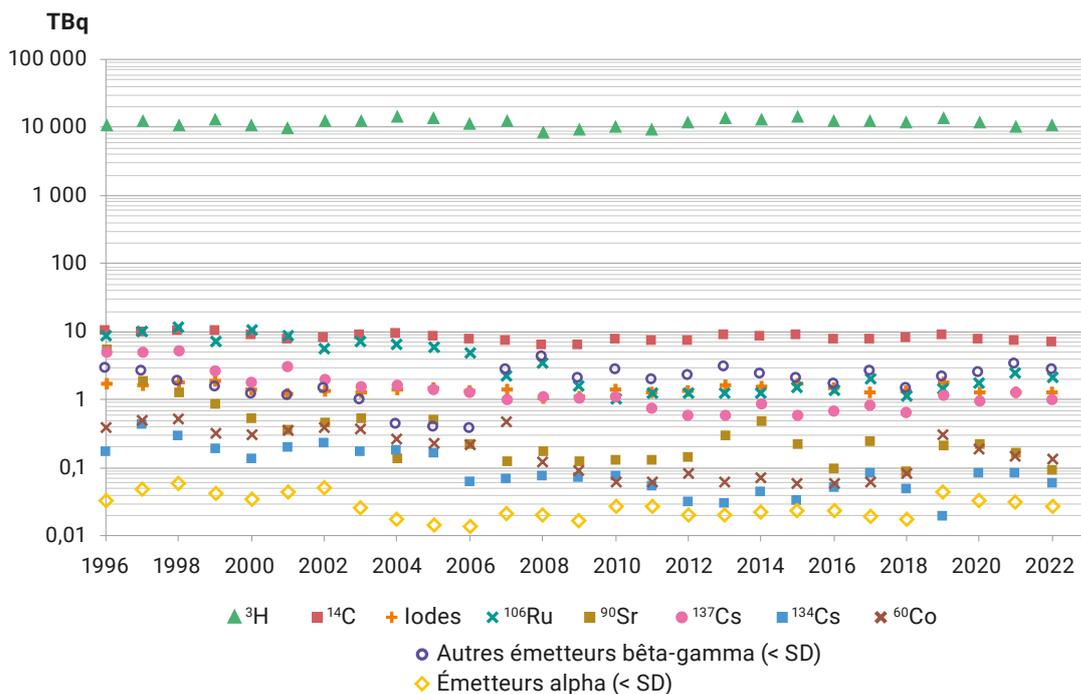


FIGURE 3 / BILAN DES REJETS LIQUIDES DES INSTALLATIONS D'ORANO RECYCLAGE DE LA HAGUE (TBq/an)



Les eaux pluviales des sites Orano et Andra de La Hague sont rejetées en fonction de leur provenance dans trois ruisseaux : les Combes, la Sainte-Hélène et les Moulinets. Le ruisseau des Moulinets reçoit également les eaux usées en provenance du site Orano (figure 4).

En ce qui concerne les effluents liquides du Centre de stockage de la Manche, les eaux de drainage sont collectées et envoyées vers le site d'Orano La Hague pour être rejetées en mer. Les activités concernées sont négligeables au regard de celles rejetées par Orano. Le principal radionucléide rejeté par voie liquide est le tritium (2,1 GBq en 2022).

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

Les tableaux 1 et 2 détaillent le plan de surveillance réglementaire mis en œuvre par Orano et le plan de surveillance de l'IRSN dans l'environnement de l'établissement d'Orano La Hague ainsi que celui de l'Andra autour du centre de stockage de la Manche. Compte tenu du nombre de radionucléides rejetés par les installations et des différentes matrices potentiellement impactées, le plan de surveillance du site de La Hague est particulièrement étendu.

FIGURE 4 / LES REJETS D'EAUX PLUVIALES ET D'EAUX USÉES DU SITE D'ORANO RECYCLAGE DE LA HAGUE

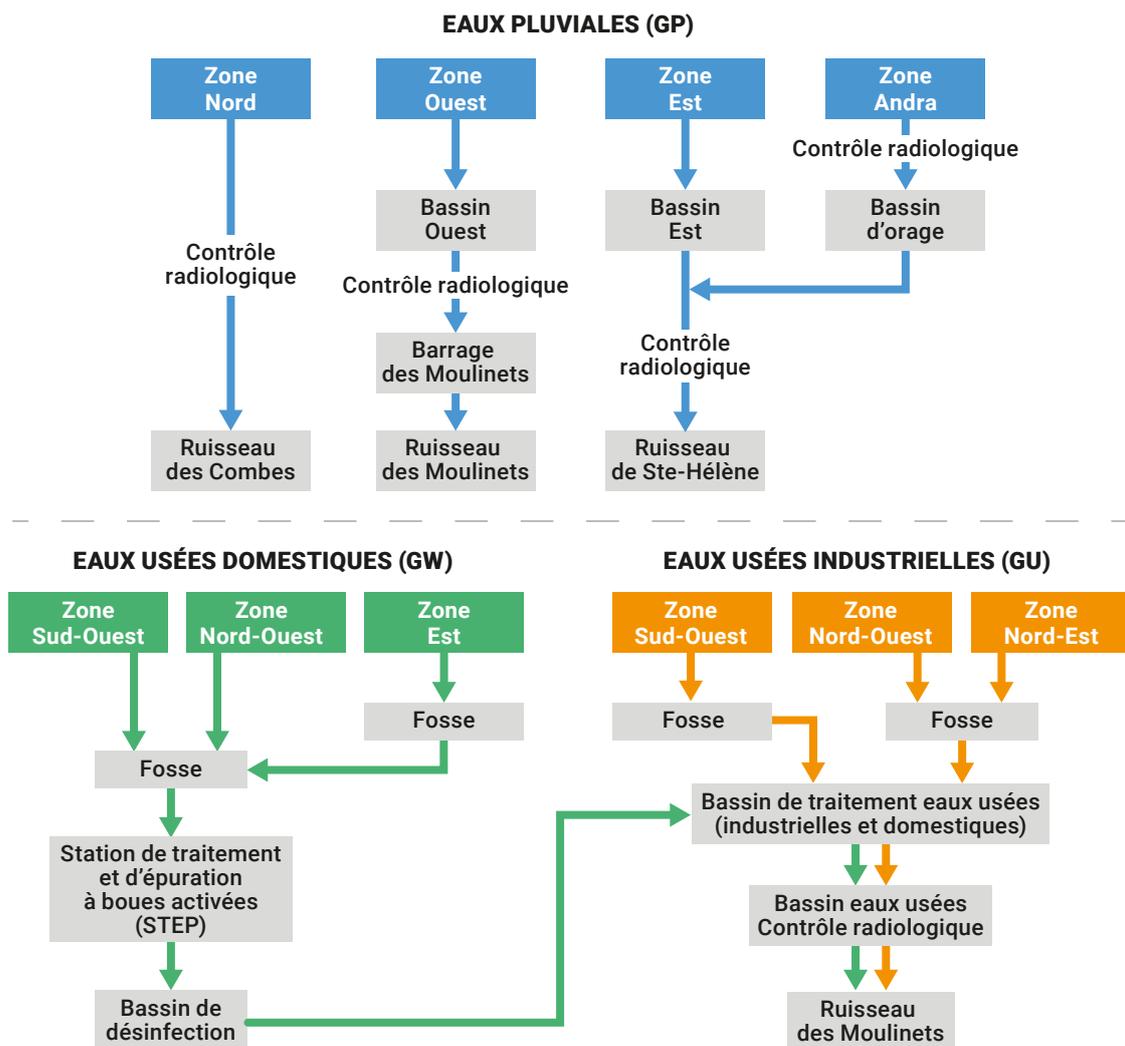


TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT MARIN DU SITE DE LA HAGUE
 EFFECTUÉS PAR ORANO ET PAR L'IRSN

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Orano	IRSN
Eau de mer	<ul style="list-style-type: none"> 5 points : 2 sur la côte, 3 au large : HTO et spectrométrie γ (quotidienne ou trimestrielle), mesures de l'indice β global et ^{129}I (mensuelles - anse des Moulinets et Goury), spectrométrie α et ^{90}Sr (mensuelles ou trimestrielles) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement à fréquence semestrielle à mensuelle : HTO, spectrométrie γ (^{137}Cs) trimestrielle et spectrométrie α (Pu/Am/Cm) semestrielle sur 1 point
Algues	<ul style="list-style-type: none"> 12 points de prélèvement à fréquence trimestrielle : ^{14}C (6 points), spectrométrie γ, spectrométrie α (6 points), HTO et TOL sur 1 point annuellement 	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvement à fréquence trimestrielle : mesures spectrométrie γ, TOL, ^{14}C et ^{90}Sr, spectrométrie α (Pu, Am, Cm)
Sédiments marins/ Sables de plage	<ul style="list-style-type: none"> 8 points de prélèvement de sédiments marins à fréquence trimestrielle : spectrométrie γ, spectrométrie α et ^{90}Sr 12 points de prélèvement de sables de plage à fréquence trimestrielle : spectrométrie γ 	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement de sables de plage à fréquence semestrielle à trimestrielle : spectrométrie γ, mesures ^{90}Sr, spectrométrie α (Pu, Am, Cm)
Poissons	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvement à fréquence trimestrielle : ^{14}C, spectrométrie γ, spectrométrie α, HTO et TOL sur 1 point annuellement 	<ul style="list-style-type: none"> 3 prélèvements annuels : spectrométrie γ, TOL, ^{14}C et ^{90}Sr, spectrométrie α (Pu, Am)
Mollusques	<ul style="list-style-type: none"> 12 points de prélèvement de patelles à fréquence trimestrielle : spectrométrie γ sur tous les points, ^{14}C, spectrométrie α sur 6 points, HTO et TOL sur 1 point annuellement 3 points de prélèvement d'autres mollusques à fréquence trimestrielle : ^{14}C, spectrométrie γ, spectrométrie α, HTO et TOL sur 2 points annuellement 	<ul style="list-style-type: none"> 3 prélèvements semestriels à trimestriels : spectrométrie γ, TOL et ^{14}C, spectrométrie α (Pu, Am, Cm)
Crustacés	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement à fréquence trimestrielle : ^{14}C, spectrométrie γ, spectrométrie α, HTO et TOL sur 1 point annuellement 	



La plateforme de surveillance de l'IRSN d'Omonville-la-Petite

© IRSN

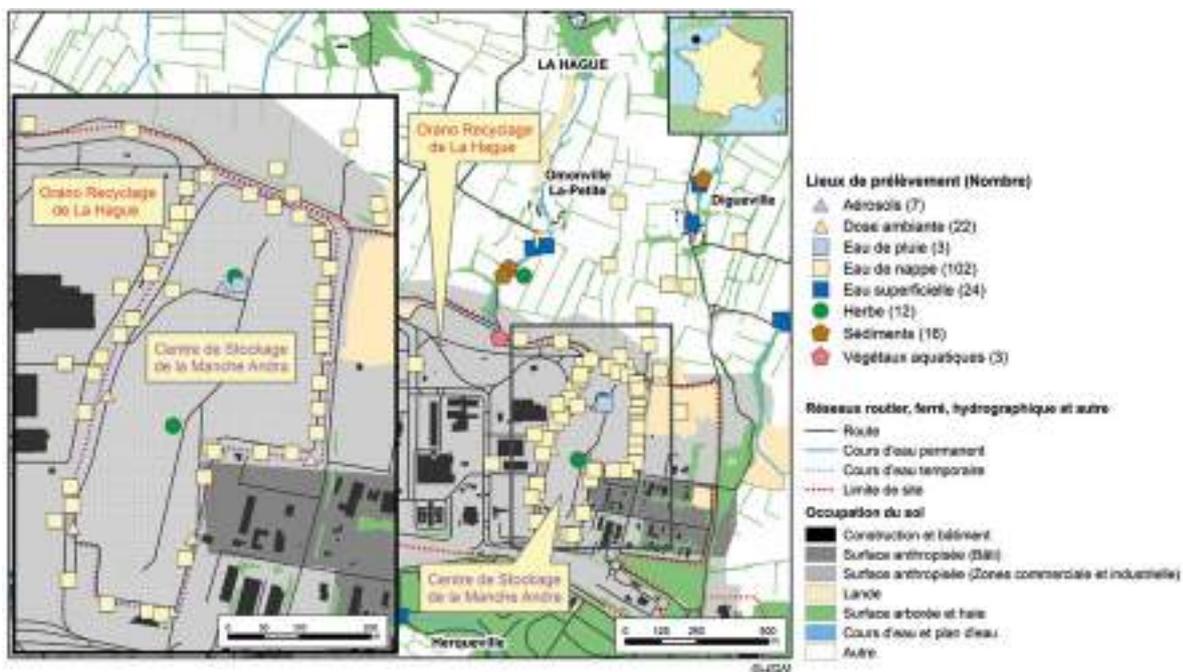
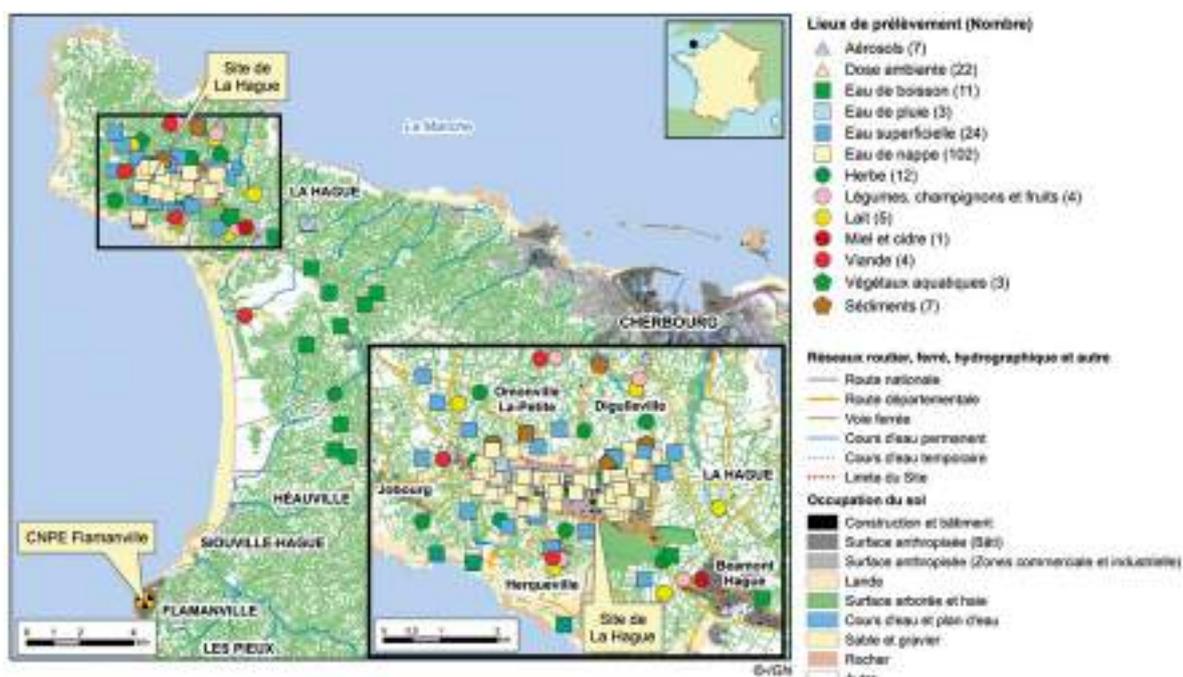
TABLEAU 2 / PLANS DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE DU SITE DE LA HAGUE EFFECTUÉS PAR ORANO, L'ANDRA ET L'IRSN

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Orano	Andra	IRSN
Débit d'équivalent de dose gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> 8 stations clôture et 5 stations dans les villages de Gréville, Beaumont-Hague, Herqueville, Digulleville et Jobourg : mesure en continu du débit de dose 	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 station (nord du site) et 5 stations village Orano : mesure en continu du débit de dose et spectrométrie γ
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> 5 stations village : mesure des indices α et β globaux sur filtre quotidien, spectrométrie γ, si β global > 2 mBq/m³, spectrométrie α sur cumul mensuel de filtres, iodes sur cartouche (hebdomadaire), ³H (hebdomadaire), ¹⁴C (bimensuelle), ⁸⁵Kr (en continu) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 station : mesure des indices α et β globaux sur filtre (quotidien) spectrométrie γ, si β global > 2 mBq/m³, ³H (hebdomadaire) 2 points de mesure de l'activité volumique en radon à fréquence mensuelle 	<ul style="list-style-type: none"> 1 station (nord du site) : mesures spectrométrie γ, mesure des indices α et β globaux sur filtre (hebdomadaire), une mesure Pu/Am par mois sur filtre hebdomadaire (1^{re} période), iodes sur cartouche (hebdomadaire), ³H (bimensuelle) 1 station (sud du site) : ³H (bimensuelle) (piégeur passif)
Dosimètre	<ul style="list-style-type: none"> 11 points à la clôture, mesures mensuelles 	<ul style="list-style-type: none"> 11 points (10 à la clôture et 1 sur la partie sommitale du CSM) : mesures mensuelles 	-
Pluie	<ul style="list-style-type: none"> 2 stations : mesures hebdomadaires HTO, mesure des indices α et β globaux et spectrométrie γ, si comptage α ou β significatif 	<ul style="list-style-type: none"> 1 station : HTO, mesure des indices α et β globaux (hebdomadaires) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 station : HTO (hebdomadaire)
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> 56 piézomètres, dont une douzaine hors du périmètre du site : mesures des indices α et β globaux, HTO (mensuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 23 piézomètres : mesures des indices α et β globaux, ³H total (mensuelles) 17 piézomètres : mesures des indices α et β globaux, ³H total (bimestrielles) 10 piézomètres : mesures des indices α et β globaux, ³H total (semestrielles) 12 piézomètres : spectrométrie γ, ¹⁴C, ³⁶Cl, ⁹⁰Sr, ⁹⁹Tc (annuelles) 6 piézomètres : Pu/Am (quinquennales) 	-
Eaux de consommation	<ul style="list-style-type: none"> 12 points : mesures des indices α et β globaux, HTO (mensuelles ou trimestrielles) 	-	-
Eaux de sources et ruisseaux	<ul style="list-style-type: none"> 7 points : mesures des indices α et β globaux, HTO, spectrométrie γ (hebdomadaires ou semestrielles) Sur 4 ruisseaux : mesures spectrométrie γ et ⁹⁰Sr (mensuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 5 points : mesure des indices α et β globaux, ³H total hebdomadaires Sur 2 points : spectrométrie γ, ¹⁴C, ³⁶Cl, ⁹⁰Sr, ⁹⁹Tc, Pu/Am annuelles 	<ul style="list-style-type: none"> 6 points de prélèvement à fréquence trimestrielle ou semestrielle : HTO, spectrométrie γ, ⁹⁰Sr, Pu/Am sur 1 point
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 7 points de prélèvement : spectrométrie γ (trimestrielles), ¹⁴C (annuelle en deux points) 	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement : mesures spectrométrie γ, spectrométrie α (Pu/Am), ⁹⁰Sr
Herbes	<ul style="list-style-type: none"> 10 points : TOL, ¹⁴C, spectrométrie γ (mensuelle ou trimestrielle), spectrométrie α (annuelle), HTO sur deux points (semestrielle) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points aux niveaux de la couverture, spectrométrie γ (mensuelle) 	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvement à fréquence trimestrielle : mesures spectrométrie γ, HTO et TOL, ¹⁴C
Lait	<ul style="list-style-type: none"> 5 points : HTO, ¹⁴C, ¹²⁹I, ⁹⁰Sr, spectrométrie γ (mensuelles) 	-	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvement à fréquence semestrielle : mesures spectrométrie γ, HTO, ¹⁴C, ¹²⁹I, ⁹⁰Sr
Viande	<ul style="list-style-type: none"> 2 à 3 échantillons par an : HTO et TOL, ¹⁴C, spectrométrie γ, spectrométrie α et ⁹⁰Sr sur un échantillon 	-	-
Autres denrées (légumes, œufs, miel, champignons...)	<ul style="list-style-type: none"> 10 à 12 échantillons par an : TOL, ¹⁴C, spectrométrie γ, 1 spectrométrie α/an (Pu, ²⁴⁴Cm) et ⁹⁰Sr 	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement de céréales annuel : spectrométrie γ, TOL, ¹⁴C, ⁹⁰Sr
Plantes de cours d'eau	<ul style="list-style-type: none"> 3 points pour 12 prélèvements par an : TOL, spectrométrie γ 	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement : mesures spectrométrie γ, spectrométrie α (Pu/Am et Cm), ⁹⁰Sr
Sédiments	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement à fréquence trimestrielle : mesures spectrométrie γ et spectrométrie α 	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvement : spectrométrie γ (trimestrielle), ¹⁴C, ³⁶Cl, ⁹⁰Sr, ⁹⁹Tc, Pu/Am (annuelles sur 1 point) 	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvement à fréquence trimestrielle : mesures spectrométrie γ, ⁹⁰Sr, spectrométrie α (Pu/Am)

La figure 5 permet de localiser les points de surveillance où sont prélevés les échantillons des compartiments terrestre, aquatique continental et atmosphérique. La figure 6 détaille la localisation des sites de prélèvement marins.

Étant donné les forts courants marins à proximité de la conduite de rejet d'Orano La Hague, l'influence des rejets en mer d'Orano est décelable au-delà de l'environnement immédiat du site et sur l'ensemble de la Manche.

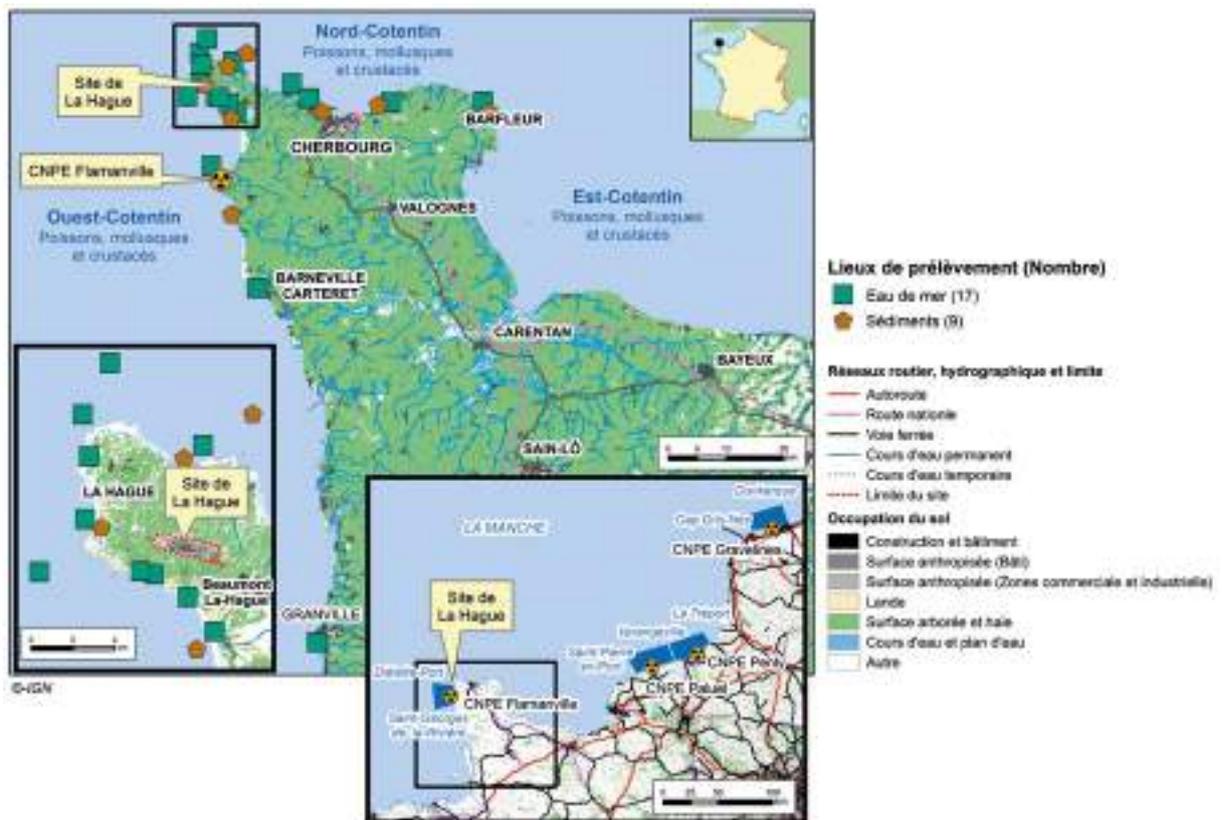
FIGURE 5 / LOCALISATION DU SITE DE LA HAGUE, DES COMMUNES ET DES STATIONS SUR LESQUELLES SONT PRÉLEVÉS LES ÉCHANTILLONS AQUATIQUES (hors prélèvements marins), TERRESTRES ET ATMOSPHÉRIQUES (surveillances exploitants)



Ainsi, les mesures réalisées par EDF autour des CNPE marins (Flamanville, Penly, Paluel et Gravelines ; cf. chapitre 2.1), par l'ACRO et par l'IRSN, font état de l'étendue de cette influence. Sur la figure 6, les zones

de prélèvement marins réalisés entre la presqu'île du Cotentin et la frontière avec la Belgique sont également représentées.

FIGURE 6 / LOCALISATION DES SITES DE PRÉLÈVEMENT MARINS AUTOUR DE LA HAGUE (surveillance Orano)



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

© Orano/J.-M. Taillat

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, de l'iode-129 et du tritium, qui sont mesurés significativement (supérieur aux seuils de décision) dans les différents compartiments de l'environnement.

Le krypton-85

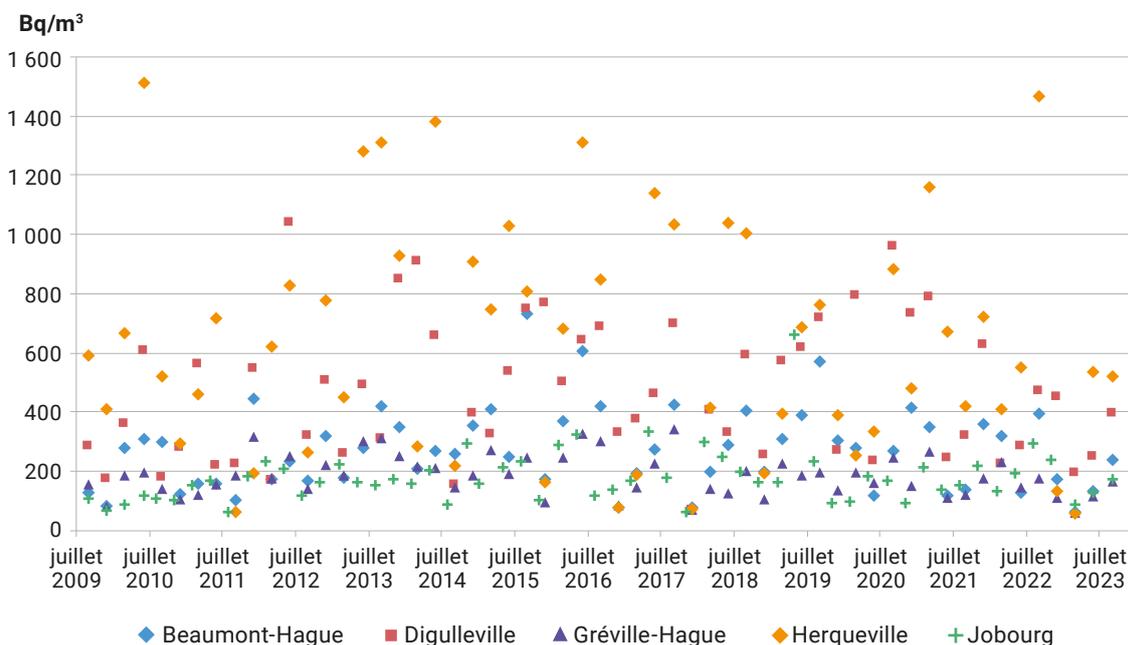
Le krypton-85 est un gaz rare qui se disperse dans l'air sans se déposer au sol. Du fait de sa nature, les activités rejetées en krypton-85 n'ont pas de conséquence sur le compartiment terrestre et notamment sur les denrées.

Les rejets de krypton-85 sous forme de « bouffées » occasionnent régulièrement des augmentations parfois importantes mais très fugaces du débit d'équivalent de dose gamma ambiant. De ce fait, il est régulièrement mesuré, à l'aide de compteurs proportionnels fixes disposés au niveau des cinq stations villages situées autour du site de La Hague : Beaumont-Hague, Digulleville, Gréville-Hague, Herqueville et Jobourg.

Les activités volumiques mesurées dans l'air fluctuent entre quelques dizaines et quelques milliers de Bq/m³, avec des valeurs moyennes calculées sur les trois dernières années, de 2021 à 2023, de l'ordre de 180 Bq/m³ à Jobourg et jusqu'à 605 Bq/m³ autour d'Herqueville (figure 7). Ces activités sont dans les mêmes ordres de grandeur que celles mesurées pour la période 2018-2020. Pour les habitants de ces communes, ce gaz rare génère exclusivement une exposition externe. Les doses efficaces estimées du fait de ces activités vont de 1,4 µSv/an à Jobourg, 1,8 µSv/an à Beaumont-Hague, 3 µSv/an à Digulleville, 1,2 µSv/an à Gréville-Hague et jusqu'à 4,6 µSv/an à Herqueville. Ces doses sont tout à fait cohérentes avec celles évaluées par Orano sur la base des rejets de 2022 : 1,15 µSv/an pour un adulte qui habiterait à Goury ; 3,23 µSv/an à Herqueville et 6,84 µSv/an pour une personne résidant dans le canton de Digulleville.

À la station d'Omonville-la-Petite, où l'IRSN a installé une balise Téléray couplée à une balise de spectrométrie gamma, il est possible de calculer la dose ajoutée liée à ces augmentations. Cette dose est estimée à 4,01 µSv en 2021, 3,64 µSv en 2022 et 3,23 µSv en 2023, ce qui est cohérent avec les estimations faites à partir des activités de krypton-85 mesurées dans l'air autour du site.

FIGURE 7 / MOYENNES TRIMESTRIELLES DES ACTIVITÉS VOLUMIQUES MENSUELLES DE KRYPTON-85 DANS L'AIR AUX CINQ STATIONS VILLAGES SITUÉES AUTOUR DU SITE DE LA HAGUE (Bq/m³) DEPUIS SEPTEMBRE 2009



Le tritium

Au niveau de l'usine Orano de La Hague, la majeure partie du tritium est piégée sous forme d'eau tritiée puis évacuée en mer. Une très faible fraction est rejetée sous forme gazeuse, néanmoins son influence est nettement visible dans le compartiment atmosphérique.

En raison des seuils de décision fixés pour la surveillance réglementaire du tritium atmosphérique (de l'ordre de $0,4 \text{ Bq/m}^3$ soit 40 fois le bruit de fond moyen de tritium dans l'air), les mesures effectuées par Orano ne permettent que rarement de quantifier l'activité en tritium total (HTO + HT) de l'air prélevé aux 5 stations situées dans les communes autour du site (moins de 1 % > SD de $0,4 \text{ Bq/m}^3$ entre 2021 et 2023 pour l'ensemble des stations). À Omonville-la-Petite, l'IRSN dispose depuis 2015, en complément de la surveillance d'Orano, d'un barboteur pour la surveillance du tritium atmosphérique et depuis 2016 à Herqueville d'un système de piégeage passif de vapeur d'eau. Ces dispositifs ainsi que les moyens métrologiques plus performants mis en œuvre à des fins d'expertise permettent de mesurer les activités de tritium dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau (HTO) pour le barboteur et le piégeur passif et d'hydrogène tritié (HT) pour le barboteur (figure 8),

ce qui permet d'acquérir un nombre plus conséquent de valeurs supérieures aux seuils de décision (> 60 %). Ainsi, entre 2021 et 2023, l'activité volumique moyenne de HT est de $0,1 \text{ Bq/m}^3$ et l'activité moyenne de HTO est de $0,06 \text{ Bq/m}^3$ à Omonville-la-Petite. L'activité volumique moyenne mesurée de HTO à Herqueville grâce au piégeur passif est de $0,069 \text{ Bq/m}^3$. Les activités mesurées sont du même ordre de grandeur que celles mesurées entre 2018 et 2020.

Le tritium est également mesuré dans l'eau de pluie recueillie sur 4 stations installées à Omonville-la-Petite et à Gréville-Hague pour Orano, à Omonville-la-Petite pour l'IRSN et à Digulleville pour l'Andra (figure 9). Pour les stations les plus exposées aux vents dominants (Digulleville et Omonville-la-Petite) les activités volumiques peuvent dépasser ponctuellement 20 Bq/L . La moyenne de l'activité de tritium dans l'eau de pluie à Omonville-la-Petite entre 2021 et 2023 est de $5,7 \text{ Bq/L}$, à comparer au bruit de fond moyen de $0,8 \text{ Bq/L}$ compris dans une gamme de $0,3$ à $1,8 \text{ Bq/L}$ observée sur la période. Ce résultat est parfaitement cohérent avec les activités de HTO dans l'air (à une activité de tritium de 1 Bq/L dans la vapeur d'eau de l'air correspond, dans des conditions théoriques moyennes, une activité de tritium dans l'air de $0,01 \text{ Bq/m}^3$ d'air).

FIGURE 8 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM (HT et HTO) DANS L'ATMOSPHÈRE À LA STATION IRSN D'OMONVILLE-LA-PETITE DEPUIS 2015 (Bq/m^3)

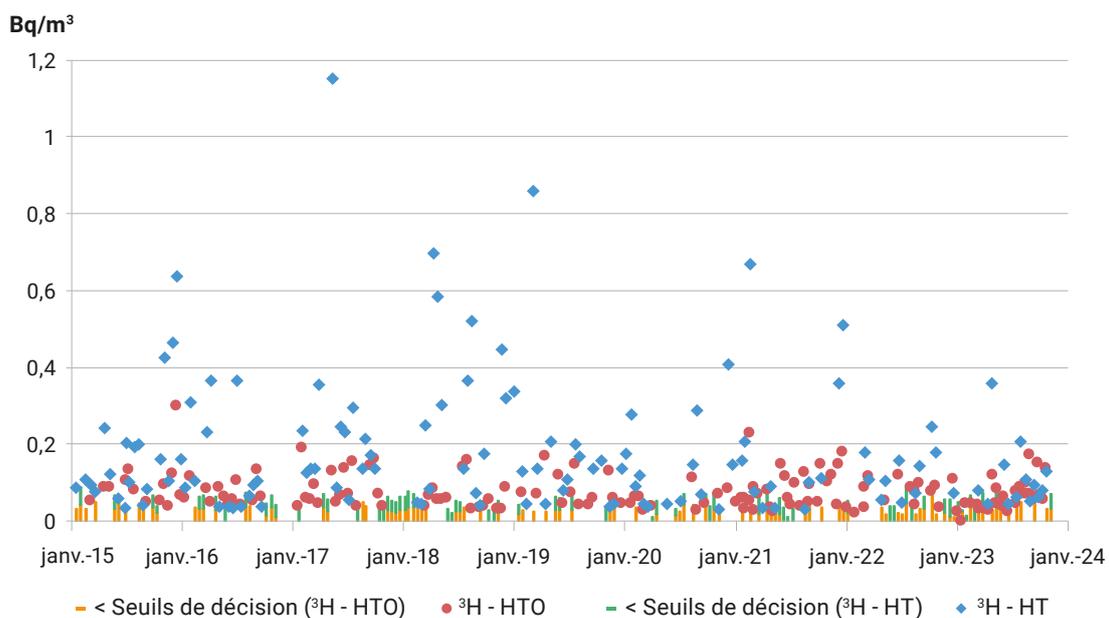
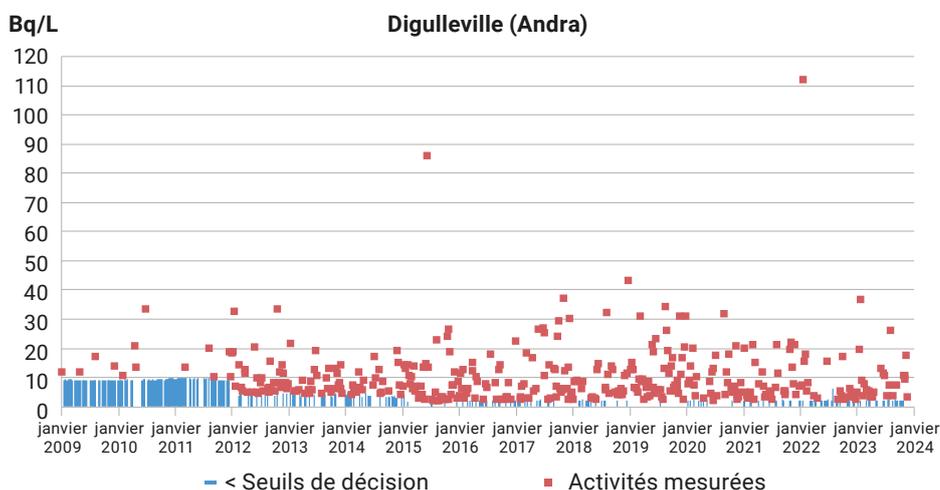
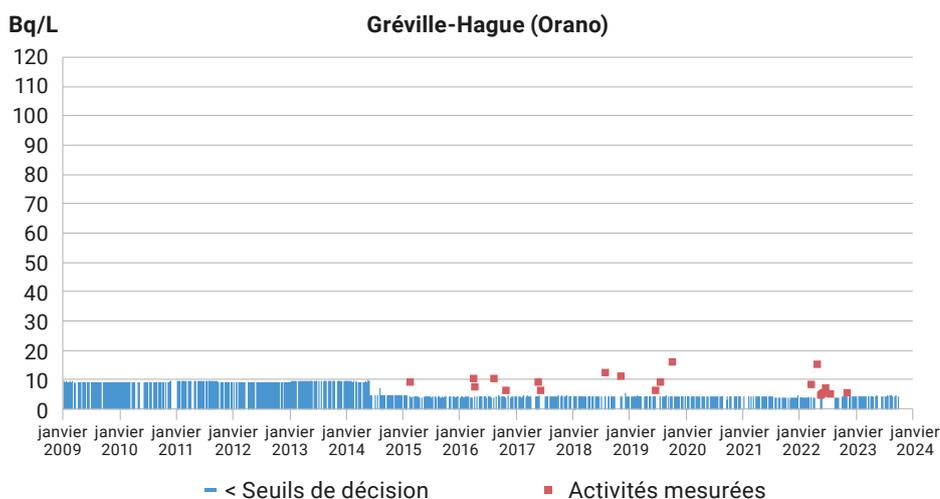
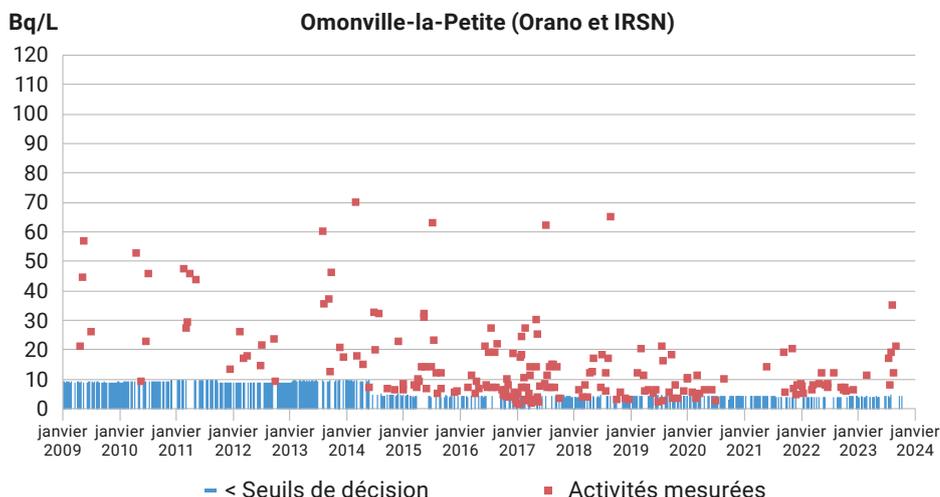


FIGURE 9 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM (HTO) DANS L'EAU DE PLUIE AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/L)



À Omonville-la-Petite, ce marquage de l'air en tritium génère pour la population une exposition interne par inhalation extrêmement faible (la dose efficace est estimée à 0,008 $\mu\text{Sv}/\text{an}$), mais également dans le cas du tritium sous forme HTO une exposition interne par voie transcutanée. La dose totale due au tritium atmosphérique est d'environ 0,016 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette dose est du même ordre de grandeur quoique légèrement inférieure à celles évaluées par Orano à partir des rejets de 2022 : 0,02 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un adulte qui habiterait à Goury et 0,06 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un adulte résidant à Digulleville. Les différences s'expliquent principalement par le lieu où sont faites les évaluations, qui est plus ou moins éloigné du point de rejet et plus ou moins sous les vents dominants.

Les activités massiques de tritium organiquement lié mesurées dans l'herbe résultent de ces activités atmosphériques. Suivant les stations de prélèvement, les activités moyennes calculées sur la période 2021 à 2023 sont de l'ordre de 1,5 à 2,5 Bq/kg frais (figure 10), donc supérieures au bruit de fond radiologique.

La répartition spatiale des activités mesurées est cohérente avec la rose des vents du site (figure 21).

Dans les légumes feuilles (poireaux, chou-fleur, persil...), les activités massiques de tritium organiquement lié, comprises entre 0,15 à 0,74 Bq/kg frais⁽¹⁾, sont supérieures au bruit de fond (0,02 Bq/kg frais). Dans les légumes racines (carotte et pomme de terre), l'activité moyenne de tritium organiquement lié est de 1,1 Bq/kg frais, très supérieure au bruit de fond radiologique (0,08 Bq/kg frais). Enfin, les mesures dans les champignons montrent une activité moyenne de tritium organiquement lié de 1,1 Bq/kg frais. Dans ces denrées, les activités moyennes de tritium organiquement lié entre 2021 et 2023 sont légèrement plus faibles que celles calculées durant la période 2018-2020, mais restent très supérieures au bruit de fond.

Les activités volumiques de tritium libre du lait sont majoritairement inférieures au seuil de décision (< 4,5 Bq/L). Entre 2021 et 2023, ce sont les prélèvements de lait provenant des communes de Digulleville et de Herqueville qui présentent le plus grand nombre de valeurs significatives (30 % de valeurs) avec une activité maximale de 12 Bq/L. Les moyennes des activités massiques de tritium organiquement lié quantifiées dans les viandes sur la période étudiée sont de 1,4 Bq/kg frais pour les volailles, 3,1 Bq/kg frais pour le mouton et 2,4 Bq/kg frais pour le lapin de garenne. Ces activités sont supérieures au bruit de fond dans ces denrées et supérieures aux activités mesurées en 2018-2020.

Les activités massiques moyennes de tritium organiquement lié dans le miel et les œufs prélevés sont respectivement de 2,1 et de 1,01 Bq/kg frais. Ces activités sont légèrement inférieures à celles observées en 2018-2020 mais restent très supérieures au bruit de fond. S'agissant des mûres, l'activité massique moyenne de tritium organiquement lié est de 1,3 Bq/kg frais.

La configuration du relief et l'étroitesse de la presqu'île du Cotentin ne laissent la place qu'à de petites rivières côtières qui se jettent toutes dans la Manche. Des activités volumiques de tritium ont été mesurées dans l'eau de tous les ruisseaux situés dans l'environnement du site (figure 11). Seuls trois d'entre eux présentent régulièrement des activités de tritium dépassant 10 Bq/L : les ruisseaux des Moulinets (source Recboc), de la Sainte-Hélène et du Grand Bel avec des activités volumiques moyennes pour les données IRSN calculées sur la période 2021-2023 de 10 Bq/L, 12 Bq/L et 173 Bq/L respectivement. Ces activités sont inférieures à celles observées sur la période 2018-2020, mais toujours nettement supérieures à l'activité moyenne du bruit de fond de ce radionucléide de l'ordre de 0,8 Bq/L.

Le ruisseau de la Sainte-Hélène est l'exutoire, après stockage dans un bassin d'orage, des eaux pluviales et des eaux de drainage de la zone est du site d'Orano La Hague et du site de l'Andra (figure 4). Le marquage en tritium qui perdure encore aujourd'hui est lié à une pollution historique datant des années 1970.

Le ruisseau des Moulinets est l'exutoire des eaux pluviales de la zone ouest du site d'Orano ainsi que des eaux usées. Enfin, le ruisseau des Combes est l'exutoire des eaux pluviales de la zone nord du site d'Orano.

Durant la période 2021-2023, sur les 12 stations surveillées par Orano autour de l'établissement de La Hague, la plupart des activités de tritium dans les eaux destinées à la consommation sont sous le seuil de décision (< 4,5 Bq/L). La plupart des mesures significatives sont, comme sur la période 2018-2020, inférieures à la dizaine de Bq/L. Pour autant, sporadiquement des activités de l'ordre de 13 à 22 Bq/L ont été mesurées au forage du Hameau Fabien, situé sur la commune de Beaumont-Hague, au forage du Bacchus et au forage du Houguet. Les activités moyennes de HTO sur la période 2021-2023 dans ces forages sont de l'ordre de la dizaine de Bq/L. L'ingestion quotidienne de 2 L d'eau provenant de ces forages génère une dose efficace de 0,12 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

(1) Il faut rappeler que l'activité de TOL exprimée en Bq/kg frais, ne représente qu'une partie (de l'ordre de 15 à 25 % pour des végétaux et jusqu'à 80 % pour des céréales dans des conditions d'équilibre) de l'activité massique totale de tritium d'un échantillon, qui résulte de la somme des activités de tritium organiquement lié (TOL) et de tritium libre (HTO).

FIGURE 10 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES SUR LA PÉRIODE 2021-2023 DE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ DANS LES HERBAGES PRÉLEVÉS SUR LES 10 STATIONS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais) ET CHRONIQUES DES ACTIVITÉS MESURÉES SUR DEUX DE CES STATIONS DEPUIS JANVIER 2009 (Bq/kg frais)

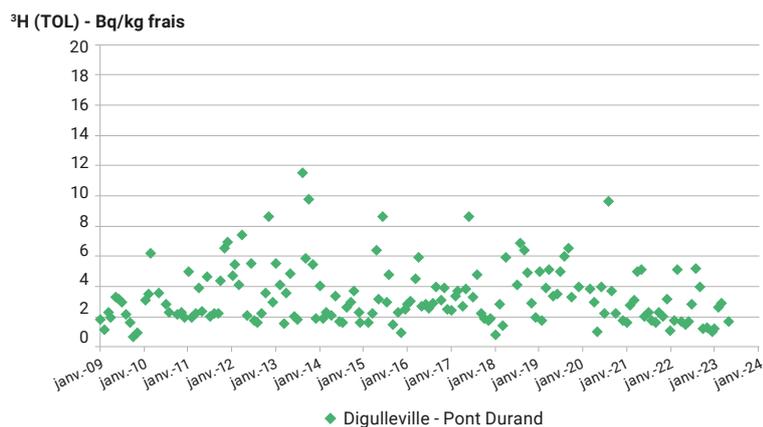
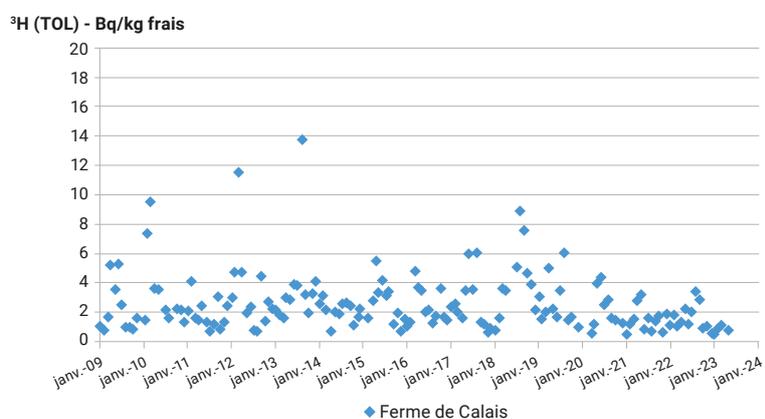
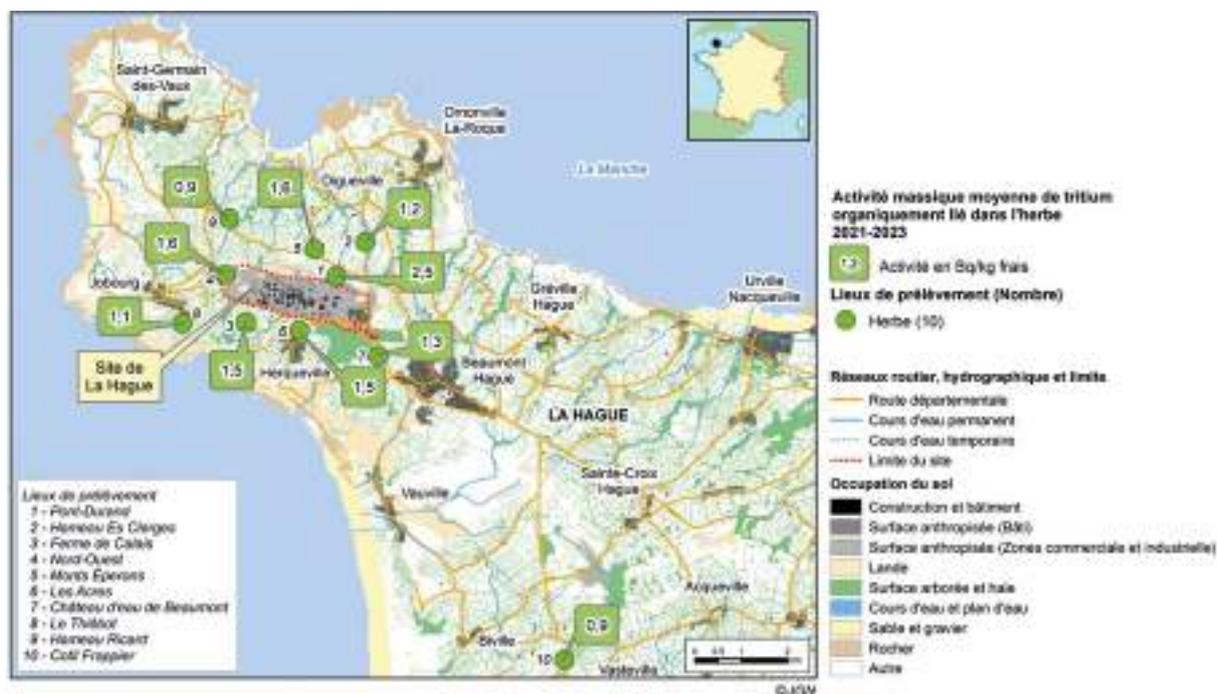
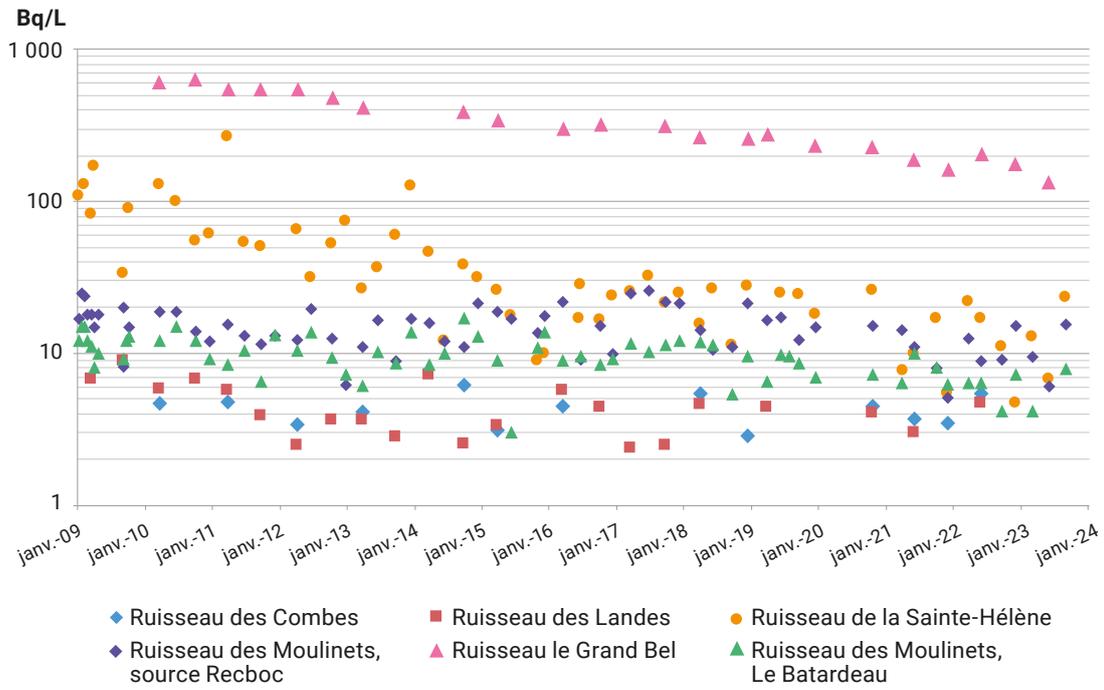


FIGURE 11 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM LIBRE (HTO) DANS LES COURS D'EAUX PRÉLEVÉS SUR LES 6 POINTS DE SURVEILLANCE DE L'IRSN AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/L) DEPUIS JANVIER 2009 ET LOCALISATION DES DIFFÉRENTS RUISSEAUX



Les eaux de la nappe phréatique situées sous le site de La Hague et plus particulièrement du CSM, présentent un marquage élevé de tritium. La nappe phréatique en aval du CSM est affectée par une contamination historique de tritium en lien avec un incident sur un ouvrage de stockage détecté en 1976. L'activité volumique de tritium, proche de 40 000 Bq/L lors du précédent bilan 2018-2020, continue de diminuer, elle est actuellement proche des 20 000 Bq/L (figure 12). Un autre marquage de tritium est visible au niveau du piézomètre 279 au droit du site d'Orano Recyclage avec une activité qui varie entre 1 000 et 1 400 Bq/L depuis 2010. L'eau de ces nappes n'est destinée à aucun usage.

L'influence des rejets liquides tritiés du site Orano La Hague et, dans une moindre mesure, de ceux de l'usine britannique de Sellafield, sont quantifiables sur l'ensemble des prélèvements réalisés en Manche.

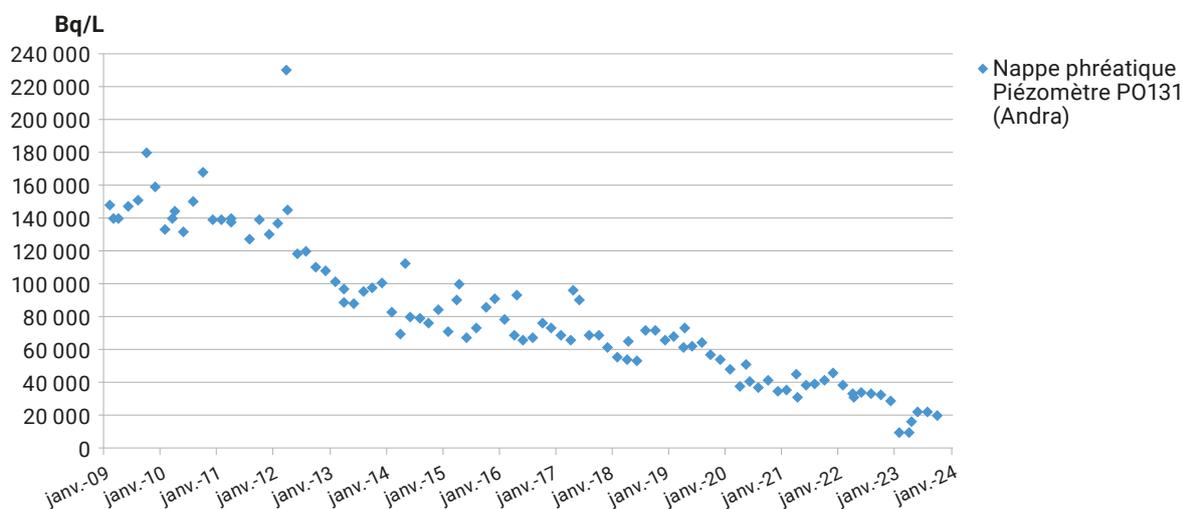
L'activité volumique moyenne de tritium libre dans l'eau de mer sur la période 2021-2023 (figure 13) se situe autour de 9 Bq/L au niveau du cap de La Hague (à comparer à un bruit de fond naturel en milieu marin de l'ordre de 0,1 à 0,2 Bq/L), de 8,6 Bq/L au port de Goury et de 8,7 Bq/L dans l'anse des Moulinets. Ces activités moyennes masquent des variations très importantes en quelques heures (cf. focus du *Bilan radiologique* IRSN de 2012). Par exemple, l'activité maximale de tritium dans l'eau de mer a été mesurée dans l'anse des Moulinets (67 Bq/L) en novembre 2021. Ces résultats sont dans la continuité des activités mesurées précédemment.

S'agissant des organismes marins, sur la période 2021-2023, les activités massiques moyennes de tritium organiquement lié sont estimées à 0,81 Bq/kg frais dans les poissons, 1 Bq/kg frais dans les coquilles Saint-Jacques prélevées dans le nord du Cotentin et 0,2 Bq/kg frais dans les huîtres prélevées dans l'est du Cotentin. En 2023, l'activité des huîtres prélevées dans l'ouest du Cotentin est de 1,6 Bq/kg frais. Les échantillons de patelles présentent une activité moyenne de tritium organiquement lié de 0,74 Bq/kg frais. Enfin, s'agissant des crustacés, l'activité massique en tritium organiquement lié en 2023 dans les tourteaux est de 1,89 Bq/kg frais.

La dose potentiellement due au tritium rejeté par le site et liée à l'ingestion de denrées locales solides (légumes, produits de la mer, viande, etc. et hors eau de boisson estimée séparément) est extrêmement faible. Elle est estimée à environ 0,13 µSv/an pour un adulte se nourrissant d'aliments produits autour du site de La Hague, sur la base des activités moyennes dans les denrées durant la période d'observation (2021-2023).

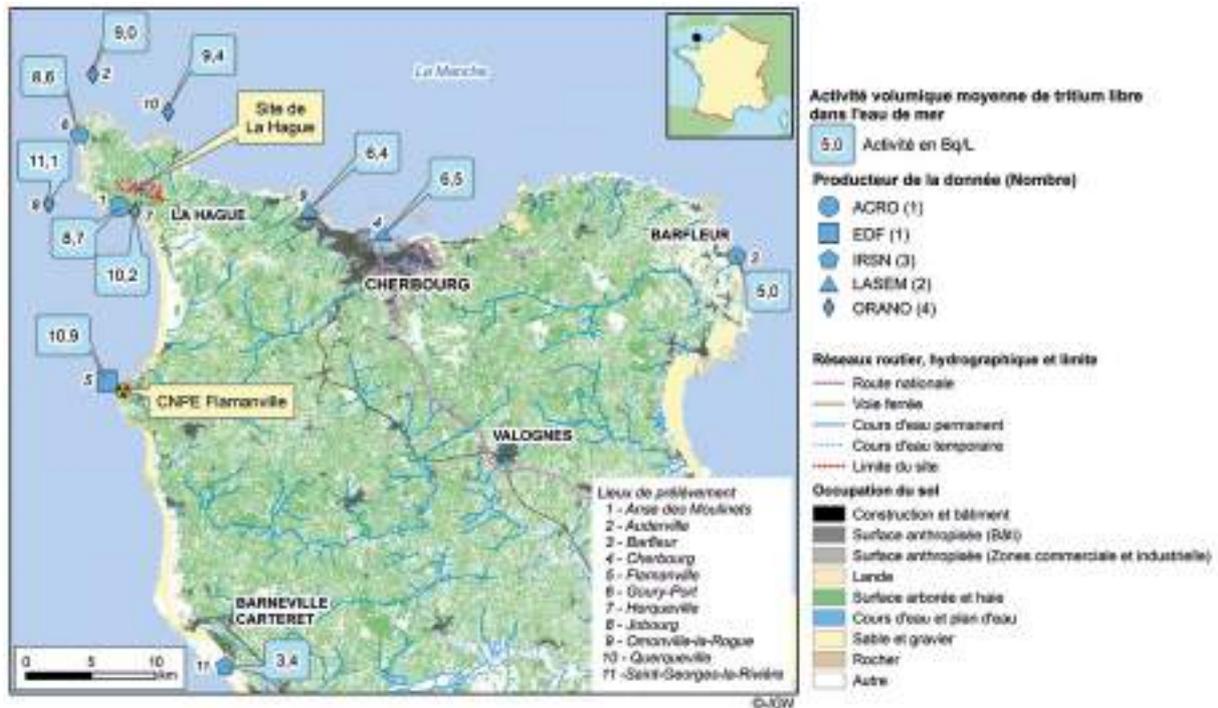
Le régime alimentaire retenu (tableau 5) est celui d'une population vivant dans le nord Cotentin et dont le chef de famille est pêcheur. Ce dernier est représentatif d'un régime alimentaire moyen avec une consommation un peu plus importante de produits de la mer. Les données du régime alimentaire ainsi que les données d'autoconsommation sont issues de l'enquête CREDOC⁽²⁾. Cette dose est négligeable au regard de celles liées aux rejets de krypton-85 présentées précédemment.

FIGURE 12 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM TOTAL DANS LA NAPPE PHRÉATIQUE AU NORD-EST ET À L'APLOMB DU CSM AU PIÉZOMÈTRE P0131 (Bq/L) DEPUIS JANVIER 2009



(2) Département Prospective de la consommation (1998) Enquête sur la consommation alimentaire dans le Nord Cotentin pour la COGEMA CREDOC.

FIGURE 13 / ACTIVITÉS MOYENNES DE TRITIUM LIBRE DANS L'EAU DE MER AU NIVEAU DE LA PRESQU'ÎLE DU COTENTIN SUR LA PÉRIODE 2021-2023 (Bq/L)



Le carbone-14

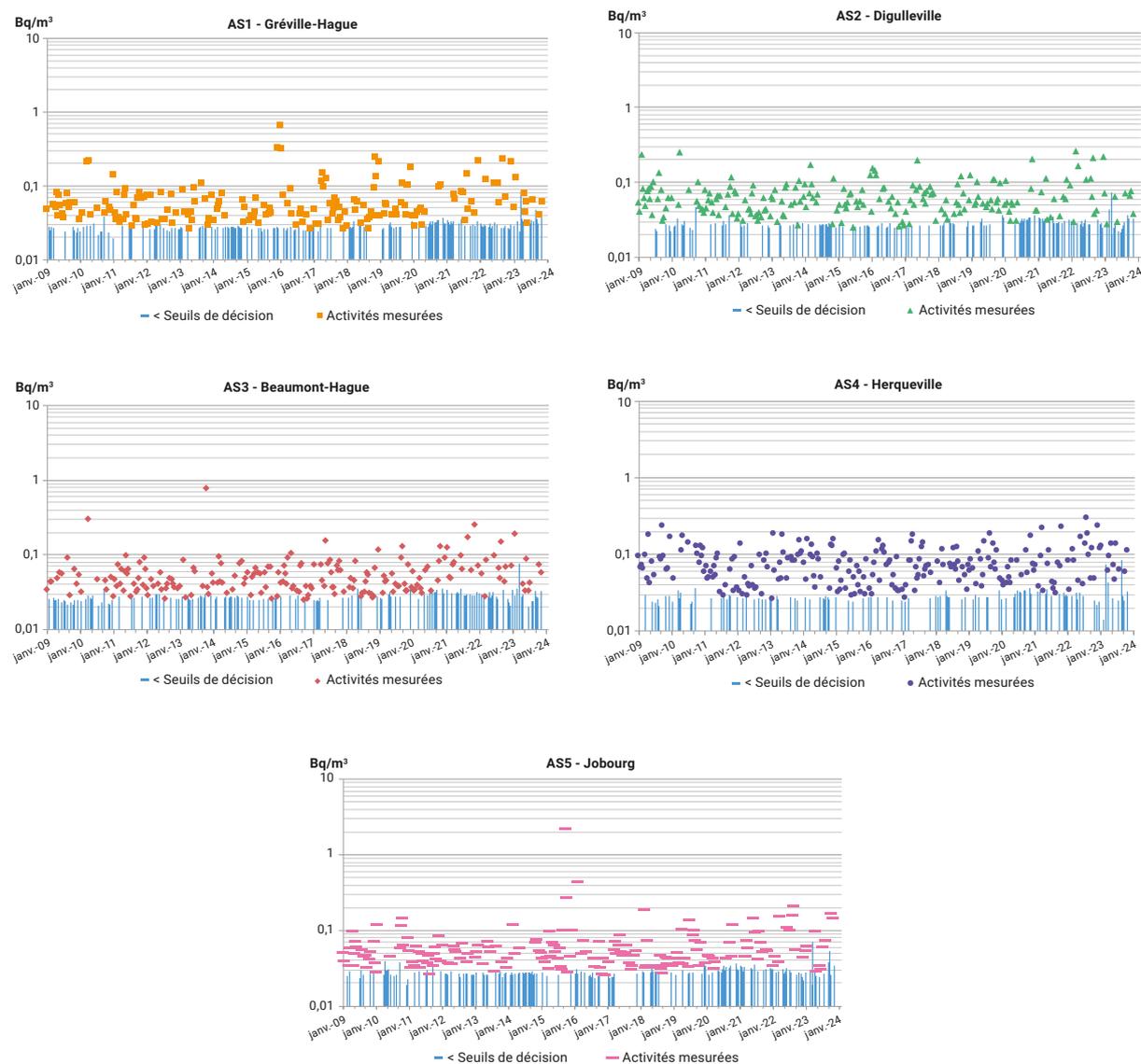
L'influence des rejets de carbone-14 sous forme liquide et gazeuse (CO_2) est visible dans la plupart des composantes de l'environnement.

Dans l'air, le carbone-14 est régulièrement quantifié au niveau des cinq stations villages situées autour du site (figure 14). Les activités volumiques mesurées bimensuellement (à l'origine des activités mesurées dans la chaîne alimentaire terrestre), fluctuent entre moins de $0,03 \text{ Bq/m}^3$ ($< \text{SD}$) et $0,30 \text{ Bq/m}^3$ soit des activités volumiques du même ordre de grandeur que celles mesurées sur la période précédente. Sur la période 2021-2023, le nombre de résultats inférieurs au seuil de décision a toutefois augmenté et le calcul de la moyenne sur les trois dernières années n'est possible que sur les activités mesurées à la station d'Herqueville ($0,07 \text{ Bq/m}^3$) pour un bruit de fond dans l'air estimé autour de $0,047 \text{ Bq/m}^3$ pour ce radionucléide.

La dose liée à l'inhalation de carbone-14 (sous forme CO_2) reçue par la population résidant sur la commune d'Herqueville où l'activité volumique moyenne est la plus élevée, est de l'ordre de $0,001 \mu\text{Sv/an}$.

L'influence des rejets de carbone-14 est plus marquée dans les denrées et notamment dans les denrées marines (poissons, mollusques et crustacés) avec des activités massiques qui fluctuent entre le bruit de fond (de l'ordre de 20 Bq/kg frais) et 2 à 3 fois cette valeur avec une tendance à la baisse notamment sur les poissons et les crustacés (figures 15 à 17). Les activités massiques moyennes calculées entre 2021 et 2023 sont comprises entre $26,9 \text{ Bq/kg}$ frais dans les poissons et 48 Bq/kg frais dans les crustacés. Dans les mollusques (hors patelles), les activités moyennes sont comprises entre 27 Bq/kg frais et 38 Bq/kg frais selon les stations. Bien qu'en moyenne les activités des poissons aient baissé (56 Bq/kg frais sur la période 2018-2020), les activités de carbone-14 dans les denrées marines restent proches des moyennes calculées sur la période précédente.

FIGURE 14 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE CARBONE-14 DANS L'AIR AU NIVEAU DES CINQ STATIONS VILLAGES DEPUIS JANVIER 2009 AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/m³)



La variabilité des activités massiques 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 sur les patelles prélevées sur les côtes du Cotentin montrent que l'influence des rejets de La Hague est nettement plus marquée à proximité du point de rejets de l'usine situé au large du nez de Jobourg que plus à l'est vers Barfleur ou plus au sud au niveau de Barneville-Carteret (figure 18). Cette influence est également confirmée

par les activités spécifiques mesurées par l'IRSN dans les patelles prélevées à Goury (moyenne de 439 Bq/kg de C sur la période 2021-2023 soit environ 31 Bq/kg frais) qui, comme les années précédentes, s'avèrent plus élevées que dans les prélèvements de patelles réalisés à Barneville-Carteret (moyenne de 276 Bq/kg de C soit environ 19 Bq/kg frais). Cette influence est par ailleurs visible, mais dans une moindre mesure, sur toutes les côtes françaises de la Manche jusqu'à Dunkerque.

FIGURE 15 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE CARBONE-14 DANS LES POISSONS PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS JANVIER 2009 (Bq/kg frais)

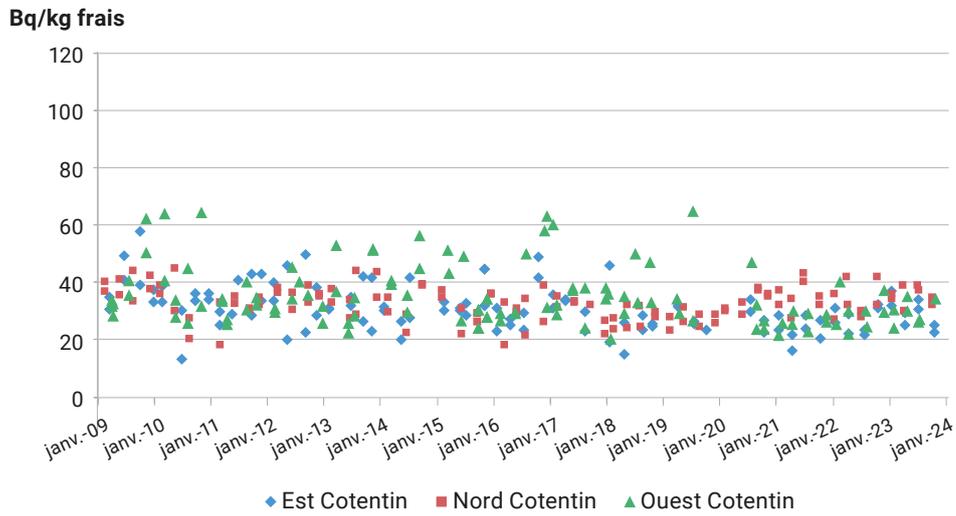


FIGURE 16 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE CARBONE-14 DANS LES CRUSTACÉS PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS JANVIER 2009 (Bq/kg frais)

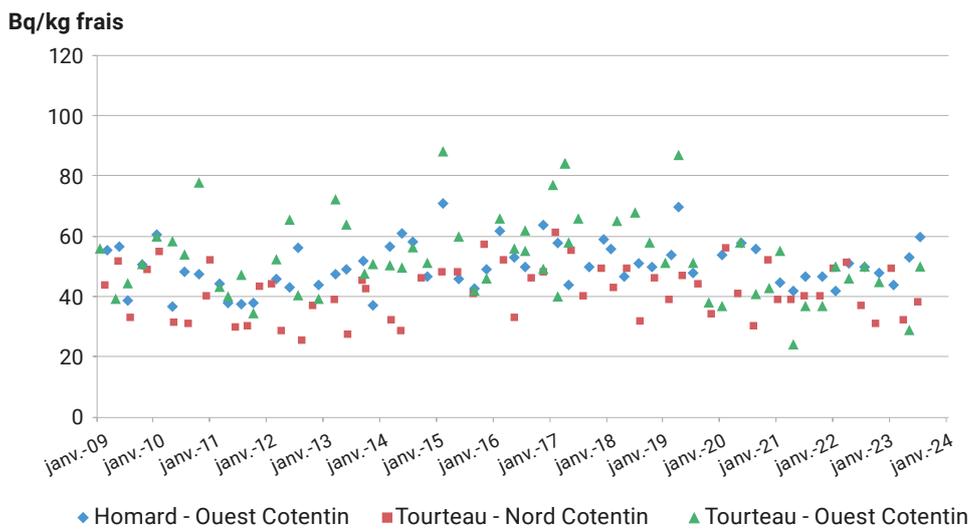


FIGURE 17 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE CARBONE-14 DANS LES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS JANVIER 2009 (Bq/kg frais)

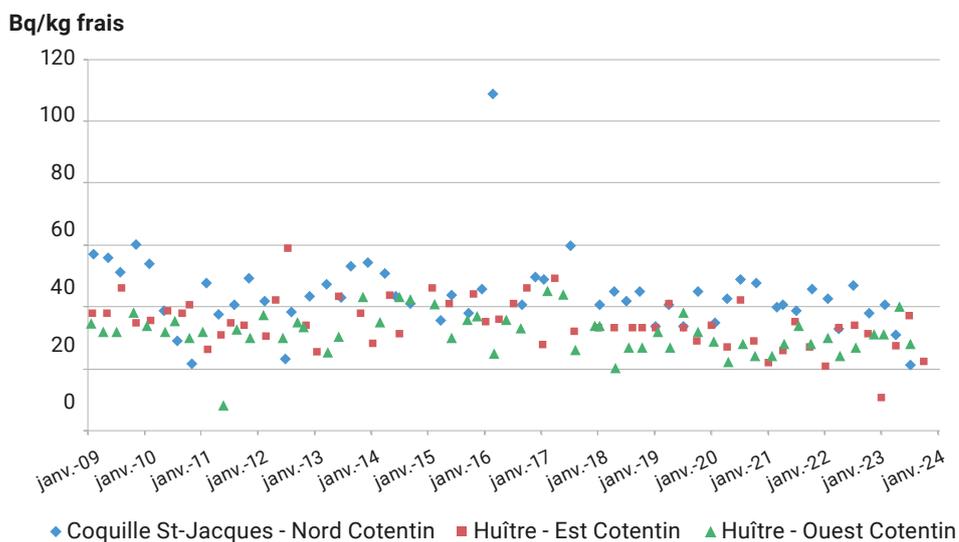
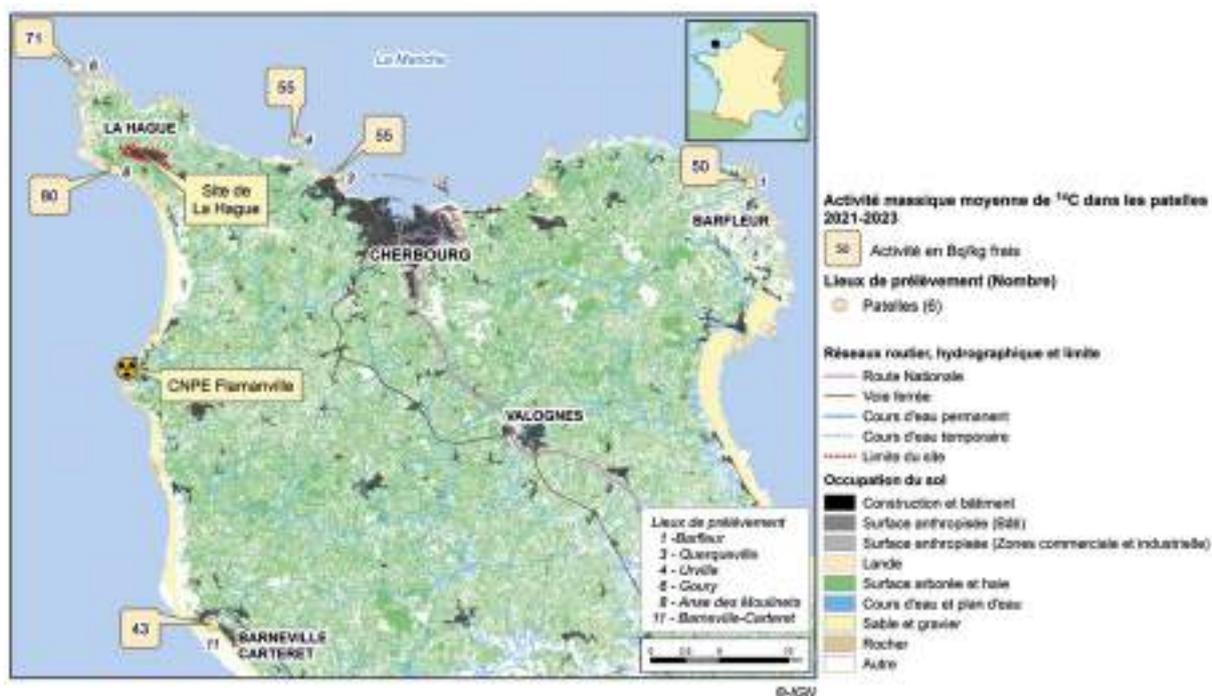


FIGURE 18 / ACTIVITÉS MOYENNES DE CARBONE-14 DANS LES PATELLES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE ENTRE 2021 ET 2023 (Bq/kg frais)



Dans le compartiment terrestre, les activités de carbone-14 autour de La Hague se distinguent également du « bruit de fond » de ce radionucléide (chapitre 1). Dans le lait (figure 19), les moyennes calculées sur la période 2021-2023 sont restées du même ordre de grandeur que sur la période précédente et comprises entre 16 Bq/L à Beaumont-Hague et 27 Bq/L à Herqueville (hameau de l'Église) pour un bruit de fond dans le lait de l'ordre de 15 Bq/L. Ponctuellement, des activités supérieures à 40 Bq/L peuvent toutefois être mesurées comme c'est le cas à Jobourg et Herqueville sur la période (figure 19).

Entre 2021 et 2023, les activités dans l'herbe sont restées globalement du même ordre de grandeur que sur la période précédente avec cependant une tendance à la baisse visible pour la plupart des stations (figure 20). L'activité moyenne calculée sur la période 2021-2023 pour l'ensemble des stations, s'élève à 196 Bq/kg sec alors qu'elle était de 213 Bq/kg sec sur la période précédente. Des activités plus importantes ont toutefois pu être ponctuellement mesurées sur certains points de prélèvement (870 ± 60 Bq/kg sec au point situé au nord-ouest du site). La figure 20 illustre également la cohérence entre la répartition spatiale des activités de carbone-14 et la rose des vents (figure 21), avec des vents dominants qui proviennent

majoritairement de l'ouest et du sud-ouest, ainsi que l'effet de la distance entre le lieu de prélèvement et le site. On peut ainsi délimiter sur cette figure les zones d'influence des rejets atmosphériques du site de La Hague.

Une étude complémentaire a été menée par l'IRSN entre 2018 et 2021 avec pour objectif de disposer d'une connaissance actualisée de l'état radiologique de l'environnement du site de La Hague en particulier du compartiment terrestre (focus sur les activités de carbone-14 et de tritium dans les ajoncs, pp. 161-166).

L'activité moyenne de carbone-14 dans les légumes feuilles et les légumes racines entre 2021 et 2023 est respectivement de 8,6 Bq/kg frais et de 12 Bq/kg frais (figure 22). Elles confirment la tendance à la baisse relevée sur la période précédente et le fait que les activités des échantillons prélevés ces dernières années sont proches du bruit de fond (7 Bq/kg frais pour les légumes feuilles et 10 Bq/kg frais pour les légumes racines). Cela s'explique probablement par un changement de lieux de prélèvement. Auparavant ils étaient majoritairement réalisés à Herqueville, situé plus proche du site et sous les vents dominants, par rapport à Beaumont-Hague où ils sont aujourd'hui prélevés.

FIGURE 19 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE CARBONE-14 DANS LE LAIT PRÉLEVÉ AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/L) DEPUIS JANVIER 2009

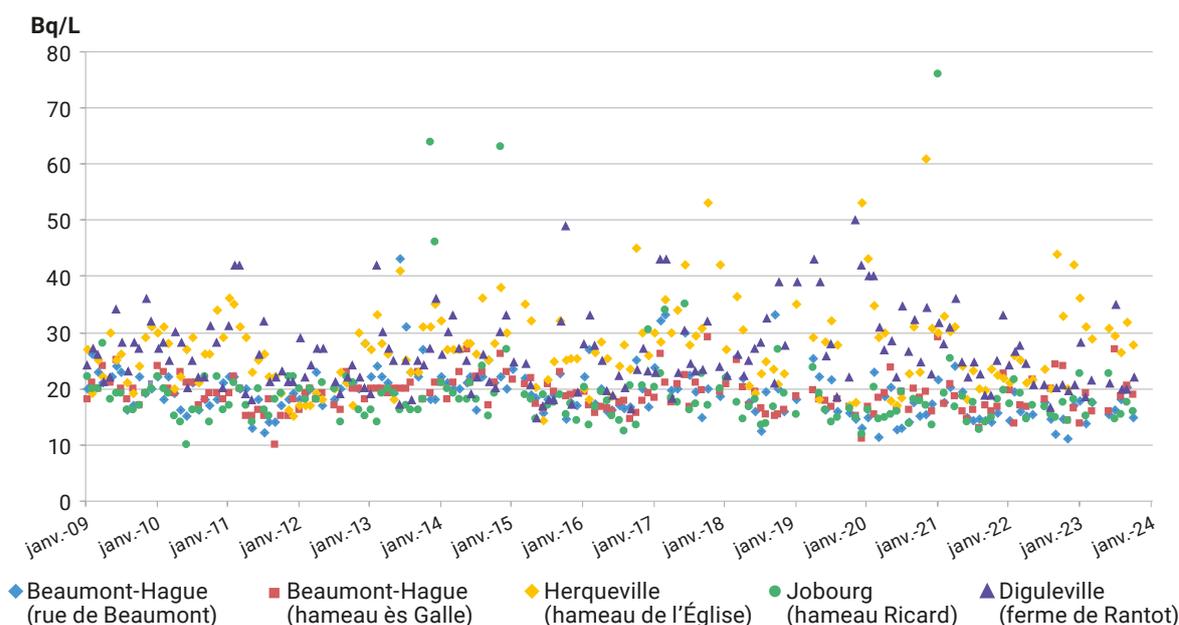


FIGURE 20 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES DE CARBONE-14 DANS LES HERBES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE ENTRE 2021 ET 2023 (Bq/kg sec)

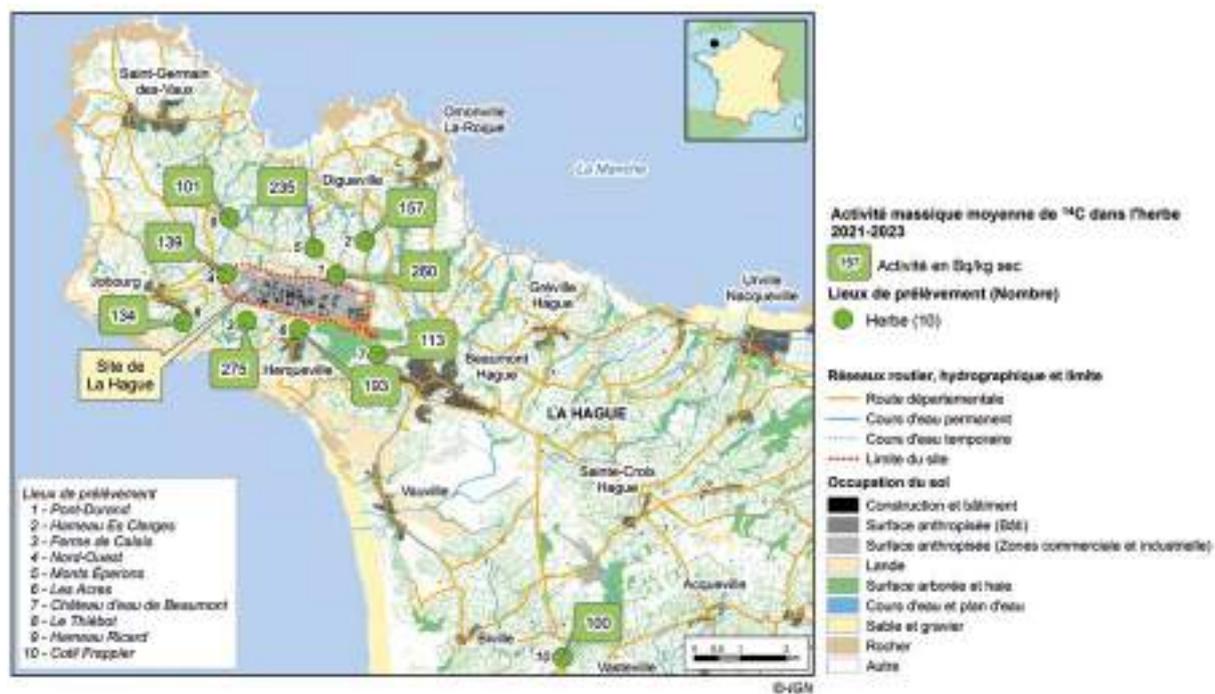
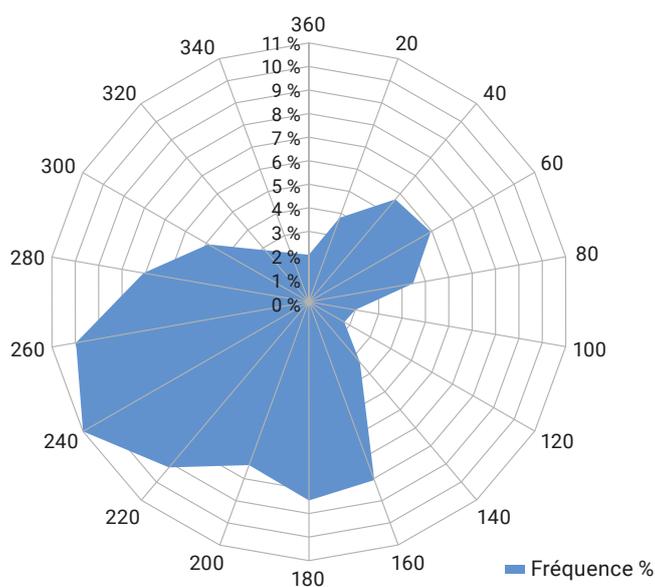


FIGURE 21 / ROSE DES VENTS (La Hague)



Les activités de carbone-14 dans les viandes (lapin, volaille et mouton) et dans les œufs sont également plus faibles qu'auparavant et proches des valeurs observées en France autour de 30 Bq/kg frais (figure 23). Il en est de même pour les fruits (mûres) avec une activité moyenne de 20 Bq/kg frais sur la période qui correspond également au bruit de fond en carbone-14 (figure 22). De manière plus générale, on observe que les activités massiques de carbone-14 dans les denrées sont plus proches du bruit de fond que celles dans les végétaux terrestres. Cela s'explique probablement par la difficulté de s'approvisionner dans un rayon d'un ou deux kilomètres autour du site d'Orano La Hague, les activités diminuant avec la distance au site et/ou lorsque les prélèvements se trouvent en dehors de l'axe des vents dominants.

Les trois échantillons de miel prélevés entre 2021 et 2023 présentent une activité massique moyenne plus élevée (62 Bq/kg frais), également en baisse par rapport à la période précédente (79 Bq/kg frais). Il en va de même pour le thym dont l'activité massique moyenne sur les trois échantillons prélevés entre 2021 et 2023 est de 74 Bq/kg frais contre 81 Bq/kg frais sur la période 2018-2020. Ces deux aliments ont la particularité de concentrer la radioactivité du fait de leur faible teneur en eau.

La principale voie d'exposition de la population associée aux rejets atmosphériques de carbone-14 est liée à la consommation potentielle de denrées produites localement. L'activité massique de carbone-14 ajoutée dans les denrées fraîches (Bq/kg frais) peut être déduite des activités de carbone-14 par unité de masse de carbone. Les analyses réalisées par l'IRSN dans les végétaux et les denrées prélevées dans l'environnement proche du site permettent ainsi d'estimer que dans les légumes et les fruits produits dans les communes proches du site, l'activité de carbone-14 est de 481 Bq/kg de carbone, soit une activité de 259 Bq/kg de carbone, ajoutée par rapport au bruit de fond de 222 Bq/kg de carbone (chapitre 1) ce qui équivaut à + 7 Bq/kg frais. Pour le lait, l'activité moyenne calculée sur la période est de 348 Bq/kg de carbone. À cette activité ajoutée de 126 Bq/kg de carbone correspond une activité moyenne ajoutée de 9 Bq/L pour le lait de vache. Sur la période, un prélèvement de blé a également été réalisé à Digulleville avec une activité spécifique de carbone-14 de 323 Bq/kg de carbone ce qui correspond à un ajout de +118 Bq/kg frais de carbone-14 dans des céréales. Par ailleurs, les analyses réalisées par l'IRSN sur les échantillons de poissons et de mollusques permettent d'estimer l'activité de carbone-14 à 354 Bq/kg de carbone, soit une activité massique ajoutée de + 17 Bq/kg frais pour les poissons marins et de + 9 Bq/kg frais pour les mollusques.

FIGURE 22 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE CARBONE-14 DANS QUELQUES DENRÉES VÉGÉTALES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais) DEPUIS JANVIER 2009

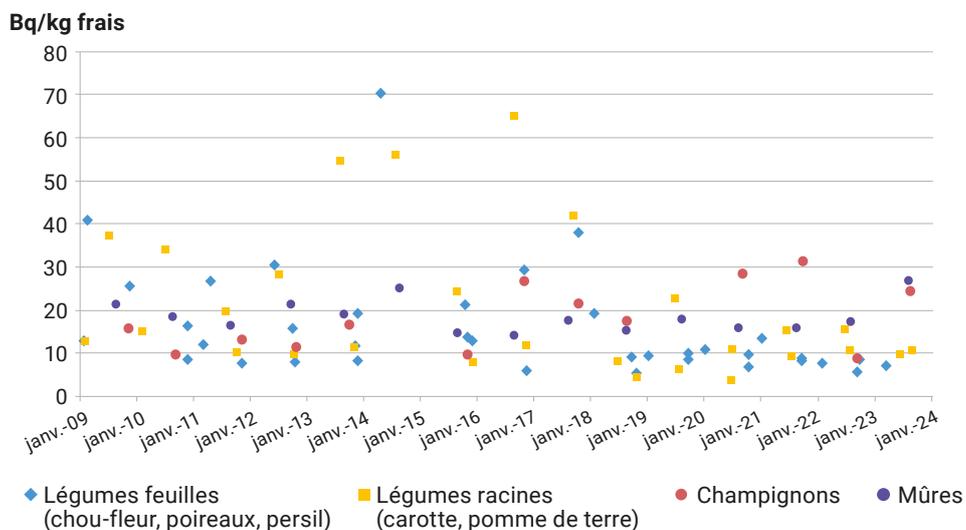
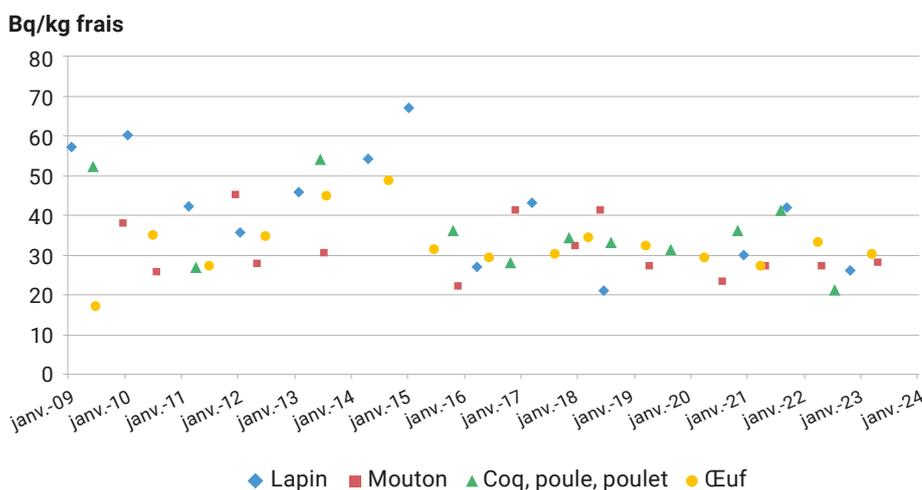


FIGURE 23 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE CARBONE-14 DANS QUELQUES DENRÉES D'ORIGINE ANIMALE PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais) DEPUIS JANVIER 2009



La dose potentiellement due à l'ingestion de denrées locales (lait, légumes, poissons, viande, miel, etc.) marquées en carbone-14 par les rejets de l'usine de La Hague est estimée 0,64 μ Sv/an pour un adulte se nourrissant d'aliments produits autour du site de La Hague sur la base des activités moyennes calculées par l'IRSN durant la période d'observation (2021-2023), elle est du même ordre de grandeur que celle calculée pour le précédent bilan 2018-2020. Le régime alimentaire retenu (tableau 5) est celui d'une population de pêcheurs vivant dans le nord Cotentin. Les données du régime alimentaire et les taux d'autoconsommation sont issus de l'enquête CREDOC réalisée dans la région en 1998.

Le carbone-14 dans les eaux de surface et les eaux souterraines ne fait pas l'objet d'un suivi régulier car les concentrations sont très faibles. Il en résulte que les activités sont difficilement quantifiables avec les techniques de mesure actuelles. L'Andra réalise toutefois un suivi annuel de l'activité de carbone-14 dans le ruisseau de la Sainte-Hélène ainsi que sur une douzaine de piézomètres répartis autour du site et dans son environnement.

Les activités dans les eaux de la Sainte-Hélène au niveau du hameau du Pont Durand et du hameau de la Fosse confirment que l'activité de carbone-14 y est faible. En 2021, une activité significative a toutefois été mesurée sur un échantillon prélevé au niveau du hameau du Pont Durand ($2,2 \pm 0,9$ Bq/L) ce qui reste assez rare (une valeur similaire avait été mesurée à ce point en 2009) et difficilement interprétable car très proche des seuils de décision (moyenne des SD mesurés sur la période $< 1,8$ Bq/L). L'Andra a en revanche mesuré des activités significatives de carbone-14 sur plusieurs piézomètres. L'activité de carbone-14 la plus élevée a été mesurée en 2022 et s'élève à $11,9 \pm 3$ Bq/L (piézomètre 174 situé à l'ouest du site en bordure du stockage).

L'iode-129

L'iode-129 est majoritairement rejeté en mer après mélange avec les eaux tritiées.

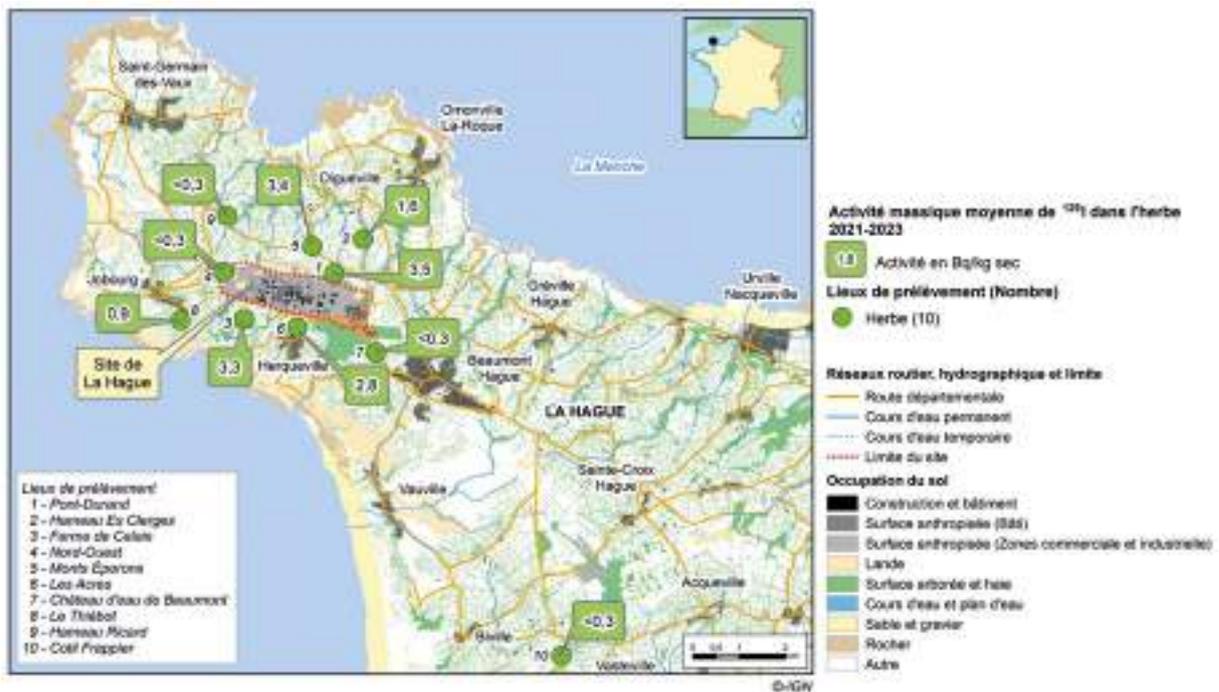
Les rejets gazeux d'iode-129 (5,87 GBq en 2022) restent limités puisqu'ils sont préalablement absorbés dans des filtres à iode installés sur les cheminées de rejet. Pour cela et en raison des seuils de décision utilisés par Orano dans le cadre de la surveillance réglementaire (de l'ordre de 0,007 Bq/m³), il n'est jamais mesuré dans l'air au niveau des cinq stations villages situées dans les communes autour du site.

À Omonville-la-Petite, l'IRSN dispose depuis 2015, en complément de la surveillance d'Orano, d'une station de prélèvement d'aérosols (80 m³/h) et d'une voie de prélèvement de l'iode gazeux sur cartouche à charbons actifs (cf. focus du *Bilan radiologique* 2015-2017, p. 141-144). Ce dispositif, ainsi que les moyens métrologiques plus performants mis en œuvre à des fins d'expertise, permettent de mesurer les activités d'iode-129

dans l'atmosphère. Sur la période considérée, les activités volumiques mesurées dans l'air fluctuent entre moins de 0,5 µBq/m³ (< SD) et 14 µBq/m³ pour l'iode-129 mesuré sous forme particulaire et entre 19 µBq/m³ (< SD) et 295 µBq/m³ pour l'iode-129 mesuré sous forme gazeuse. L'iode-129 est donc majoritairement rejeté sous forme gazeuse et la moyenne calculée entre 2021 et 2023 à Omonville-la-Petite s'élève à 47 µBq/m³ pour cette forme. Ces activités d'iode-129 dans l'air génèrent pour la population une exposition interne par inhalation extrêmement faible (la dose efficace est estimée à 0,04 µSv/an).

Les activités massiques moyennes dans les prélèvements d'herbe⁽³⁾ entre 2021 et 2023, sont comprises entre moins de 0,3 (< SD) et 3,5 Bq/kg sec, soit du même ordre de grandeur que pour la période précédente. La répartition spatiale des activités d'iode-129 dans l'herbe reste similaire à celle du carbone-14 et du tritium (figure 24).

FIGURE 24 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES D'IODE-129 DANS LES HERBES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg sec) ENTRE 2021 ET 2023



(3) Depuis 2014, pour une meilleure harmonisation des données transmises dans la base de données du Réseau national de mesures (RNM), l'ASN a souhaité que les résultats sur les matrices non comestibles soient exprimés en Bq/kg sec.

En ce qui concerne les activités d'iode-129 dans les échantillons de lait prélevés par Orano, on retrouve cette répartition géographique avec d'une part, les prélèvements réalisés dans les trois fermes situées sur les communes de Beaumont-Hague et Jobourg pour lesquelles seules quelques valeurs significatives ont été mesurées sur la période 2021-2023 (SD \approx 0,02 Bq/L) et d'autre part, les prélèvements réalisés dans les communes de Digulleville et d'Herqueville où plus de la moitié des activités sont mesurées au-dessus des seuils de décision (entre 0,01 Bq/L et 0,05 Bq/L à Digulleville et 0,01 et 0,12 Bq/L à Herqueville) avec des moyennes de l'ordre de 0,03 Bq/L pour ces deux stations (figure 25). Par rapport à la période précédente, on constate également que les activités mesurées à Digulleville ont diminué sur la période 2021-2023 alors qu'elles ont augmenté à Herqueville. Les activités mesurées dans le lait sont cohérentes avec les activités mesurées dans les échantillons d'herbes, ce qui semble indiquer qu'une partie de l'affouragement des animaux est d'origine locale.

Comme sur la période d'observation précédente, aucune des analyses réalisées dans les choux, les carottes, les pommes de terre et les poireaux n'a permis de quantifier l'iode-129 (SD < 0,1 Bq/kg frais). Des valeurs significatives ont en revanche été mesurées dans les prélèvements de persil et de thym, comprises entre 0,06 et 0,76 Bq/kg frais, et sur les champignons avec des activités comprises entre 0,06 et 0,11 Bq/kg frais.

Dans la viande (coq, lapin et mouton) et les œufs, aucune activité significative d'iode-129 n'a été mesurée sur la période 2021-2023 avec des seuils de décisions de l'ordre de 0,05 Bq/kg frais dans la viande et de 0,04 Bq/kg frais dans les œufs.

L'iode-129 est également mesuré dans les plantes aquatiques prélevées dans les cours d'eau situés au nord du site : les Landes, les Combes et la Sainte-Hélène. Les activités massiques les plus importantes étant mesurées dans la Sainte-Hélène (moyenne 2021-2023 : 28,3 Bq/kg sec) avec une légère tendance à la hausse sur la période et les plus fortes activités mesurées depuis 2009 en mai et juillet 2022 (52 ± 9 Bq/kg sec et 43 ± 8 Bq/kg sec (figure 26)). L'iode-129 n'est pas détecté dans l'eau, en revanche, il peut être quantifié dans les sédiments. Les activités les plus importantes sont, comme pour les plantes aquatiques, mesurées au niveau de la Sainte-Hélène (entre 1,3 et 8,6 Bq/kg sec sur la période 2021-2023). Ce marquage connu d'iode-129 sur la Sainte-Hélène serait dû à la sédimentation d'effluents légèrement marqués en provenance des bassins d'orage situés en amont (figure 4). On en mesure également sur le prélèvement réalisé au niveau de la retenue des Moulinets mais les activités restent proches du seuil de décision (maximum 3,5 Bq/kg sec en novembre 2022).

FIGURE 25 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES D'IODE-129 DANS LE LAIT PRÉLEVÉ AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/L) DEPUIS 2009

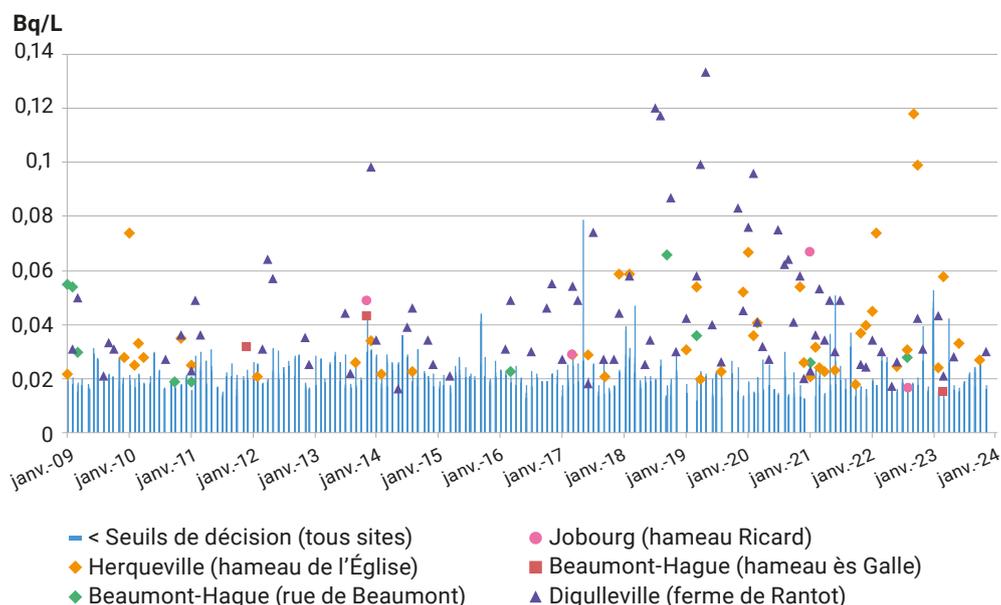
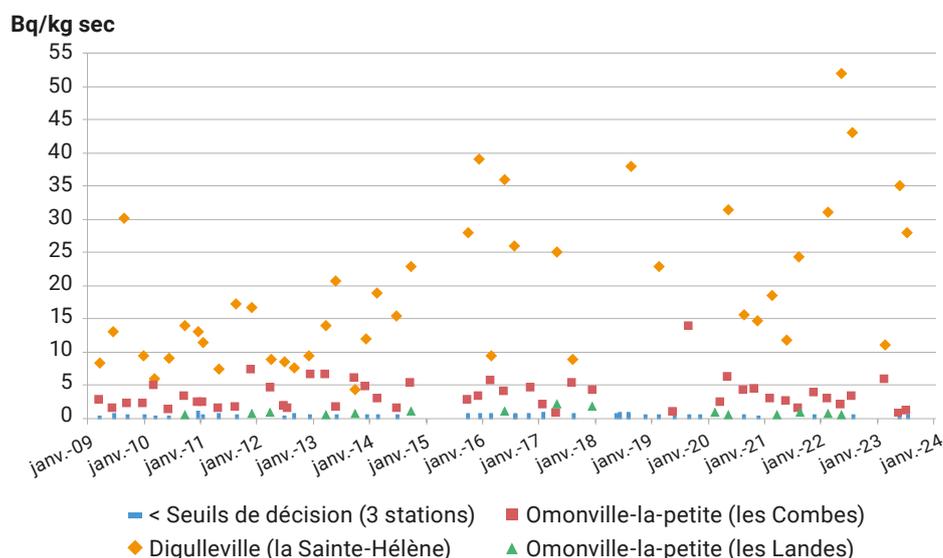


FIGURE 26 / ACTIVITÉS MASSIQUES D'IODE-129 DANS LES PLANTES AQUATIQUES PRÉLEVÉES DANS LES COURS D'EAU AU VOISINAGE DE LA HAGUE (Bq/kg sec)



Dans le compartiment aquatique marin, les activités d'iode-129 les plus élevées sont mesurées dans les algues, qui ont la particularité de concentrer cet élément, elles constituent ainsi un bio-indicateur pertinent de l'influence des rejets d'iode-129 de l'usine de La Hague en zone éloignée. L'activité dans les algues peut ainsi dépasser ponctuellement la centaine de Bq/kg sec sur les prélèvements réalisés à Goury (figure 27). Les patelles, qui se nourrissent d'algues qui poussent sur les rochers, ont également une forte propension à concentrer l'iode-129. La figure 28 montre la répartition spatiale des activités massiques moyennes calculées entre 2021 et 2023 dans les algues et les patelles prélevées sur les côtes du Cotentin. On peut constater que la répartition est la même pour les deux matrices.

Compte tenu de l'important facteur de dilution, les activités d'iode-129 dans l'eau de mer sont très faibles. Sur la période considérée, une seule valeur significative a été mesurée en décembre 2021 ($0,076 \pm 0,0012$ Bq/L) sur l'aliquote mensuelle réalisée à Goury, qui fait l'objet d'une mesure spécifique de l'iode-129 par radiochimie après concentration.

À l'instar des activités d'iode-129 mesurées dans les algues et les patelles, les denrées marines présentent un marquage en iode-129 avec des activités plus élevées dans les crustacés et mollusques que dans les poissons (figures 29 et 30). En effet sur la période 2021-2023, les activités massiques mesurées dans les poissons vont de 0,05 Bq/kg frais (< SD) sur la côte est à 0,12 Bq/kg frais sur la côte ouest de la pointe

du Cotentin alors que pour les crustacés, les activités mesurées dans les homards pêchés sur la côte ouest sont comprises entre 0,12 et 2,13 Bq/kg frais. Les tourteaux présentent également un marquage assez régulier avec des activités massiques comprises entre 0,05 (> SD) et 0,32 Bq/kg frais. Pour les mollusques, le marquage des patelles prélevées à proximité de la conduite de rejet est le plus important. Dès qu'on s'en éloigne, ce marquage diminue progressivement (figure 28). L'activité massique moyenne d'iode-129 calculée pour les crustacés et les mollusques, toutes espèces confondues, reste du même ordre de grandeur que sur la période d'étude précédente (2018-2020) avec 0,35 Bq/kg frais sur les crustacés et 0,22 Bq/kg frais sur les mollusques.

La dose potentiellement due à l'ingestion de denrées locales marquées par l'iode-129 rejeté par l'usine de La Hague est estimée à 0,24 μ Sv/an. Cette dose a été évaluée pour un adulte, en considérant exclusivement les denrées marines du régime alimentaire d'une population vivant dans le nord Cotentin et dont le chef de famille est pêcheur (tableau 5), étant donné que presque toutes les denrées terrestres ne présentent pas d'activités significatives suffisamment nombreuses pour calculer une valeur moyenne. Cette dose est du même ordre de grandeur que celle calculée dans le bilan radiologique 2018-2020 et équivalente à celle évaluée par Orano à partir des rejets de 2022 : 0,49 μ Sv/an pour un adulte résidant dans le canton de Digulleville et 0,64 μ Sv/an pour un adulte résidant dans le canton de Goury.

FIGURE 27 / ACTIVITÉS MASSIQUES D'IODE-129 DANS LES ALGUES SUR LA PÉRIODE 2021-2023 (Bq/kg sec)

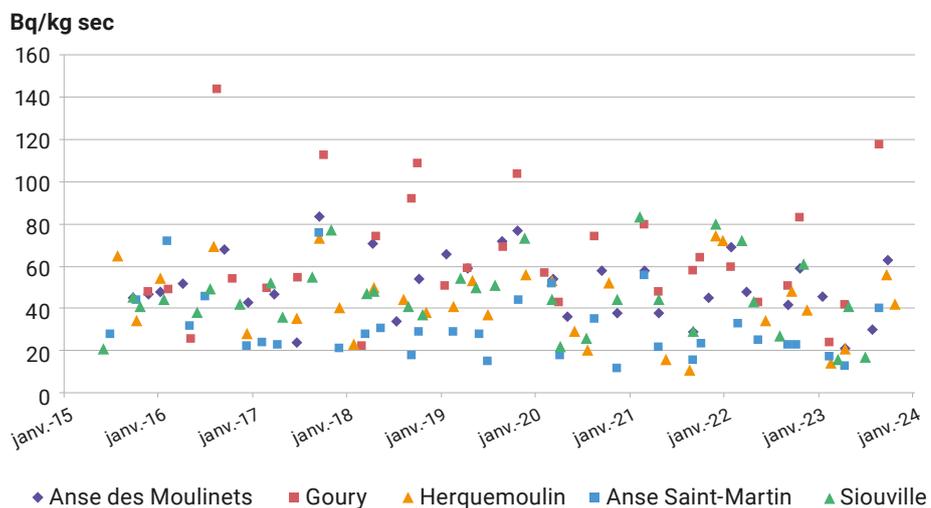


FIGURE 28 / ACTIVITÉS MOYENNES D'IODE-129 DANS LES ALGUES ET LES PATELLES SUR LA PÉRIODE 2021-2023 POUR LES DOUZE STATIONS DE PRÉLÈVEMENT

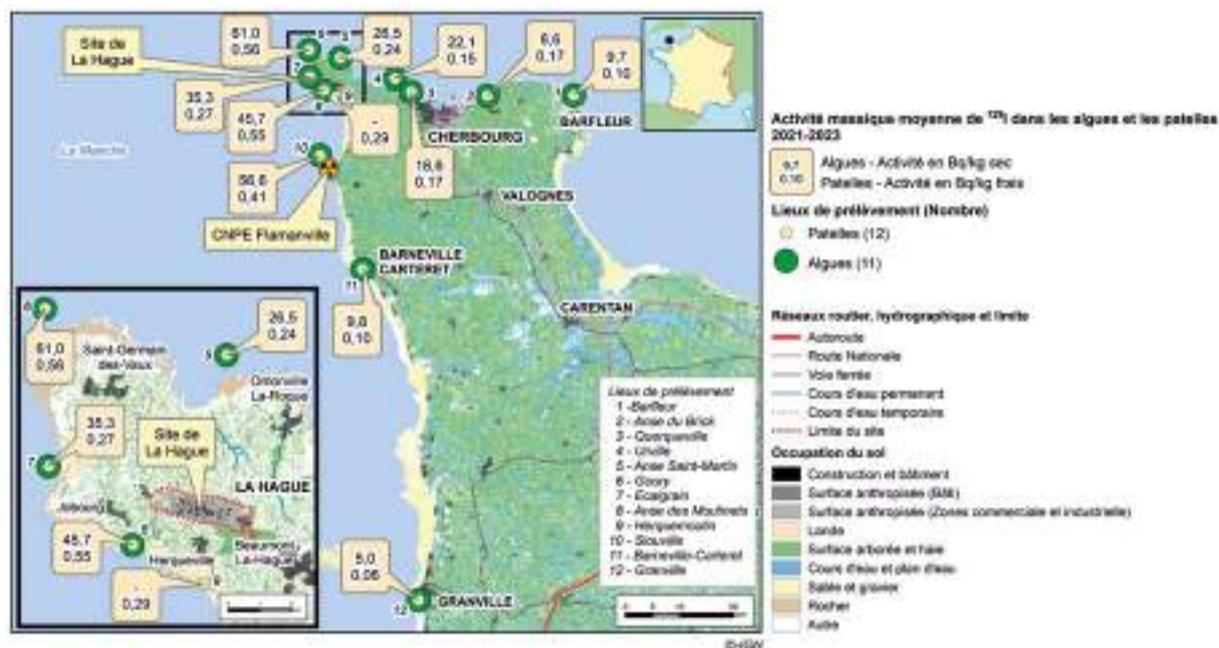


FIGURE 29 / ACTIVITÉS MASSIQUES D'IODE-129 DANS LES POISSONS PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS 2009 (Bq/kg frais)

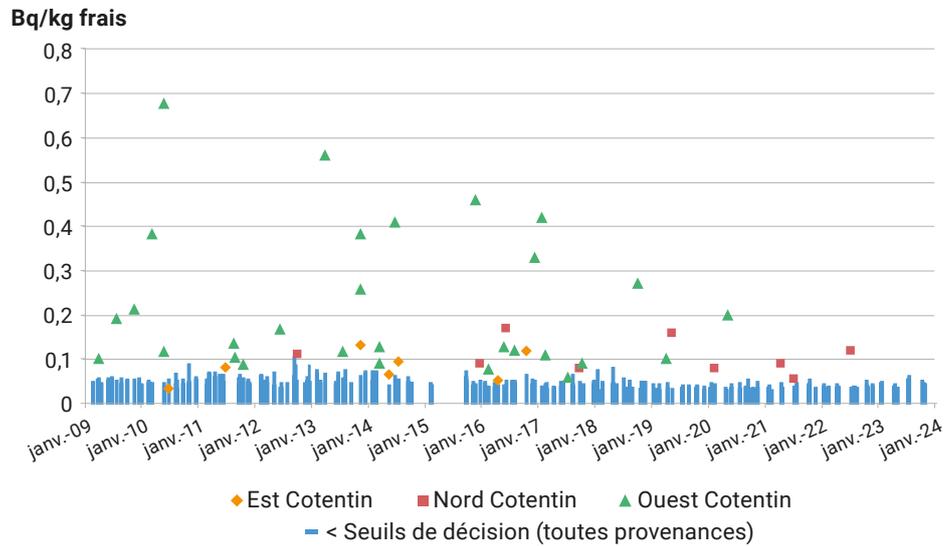
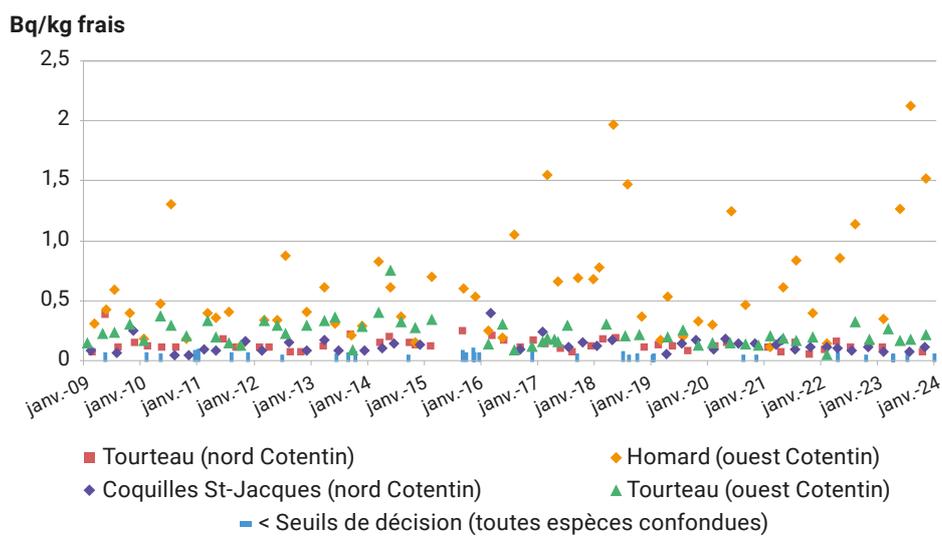


FIGURE 30 / ACTIVITÉS MASSIQUES D'IODE-129 DANS LES CRUSTACÉS ET LES MOLLUSQUES (hors patelles) PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS 2009 (Bq/kg frais)



Les plutoniums-238, 239+240 et l'américium-241

Compte tenu des activités rejetées (aérosols piégés sur filtres THE), l'influence des rejets d'actinides par l'établissement de La Hague dans le compartiment terrestre ne peut pas être distinguée de celle des retombées atmosphériques anciennes, les rejets en plutonium et en américium se faisant principalement par voie liquide *via* la conduite de rejet en mer. L'influence des rejets est également limitée dans le compartiment aquatique continental. On observe cependant un marquage des sédiments prélevés dans le ruisseau de la Sainte-Hélène, le ruisseau des Landes au niveau de la résurgence formant sa source et le bassin des Moulinets ; ce marquage est lié à une pollution ancienne par les activités du site de La Hague. À la résurgence du ruisseau des Landes, qui fait l'objet d'une surveillance complémentaire d'Orano, les activités massiques mesurées trimestriellement peuvent atteindre 27,3 Bq/kg sec de plutonium-238 et 349 Bq/kg sec de plutonium-239+240. Les activités sont de l'ordre de 0,6 Bq/kg sec d'américium-241 dans le ruisseau des Landes, et dans la Sainte-Hélène, de l'ordre de 0,13 Bq/kg sec de plutonium-238 et 0,35 Bq/kg sec de plutonium-239.

L'influence des rejets liquides dans le compartiment aquatique marin est en revanche plus marquée. Les isotopes 239+240 et 238 du plutonium sont ainsi régulièrement quantifiés dans les eaux de mer (respectivement 7,5 µBq/L et 4,2 µBq/L en moyenne) et dans les matrices les plus sensibles que sont les mollusques (figures 31 et 32). Entre 2021 et 2023, les mesures réalisées sur les coquilles Saint-Jacques

pêchées sur la côte nord du Cotentin présentent des activités massiques significatives de l'ordre de 0,013 Bq/kg frais pour le plutonium-238 et de 0,029 Bq/kg frais pour le plutonium-239+240. Ces résultats sont du même ordre de grandeur que les activités observées entre 2018 et 2020.

Pour les huîtres prélevées sur les côtes est et ouest du Cotentin, l'activité massique moyenne pour le plutonium-239+240 est de 0,007 Bq/kg frais. L'activité massique maximale mesurée est de 0,014 Bq/kg frais. Pour le plutonium-238, la majorité des résultats de mesures dans les huîtres sont inférieurs au seuil de décision (<0,004 Bq/kg frais). Une seule activité significative, c'est-à-dire supérieure aux seuils de décision, a été quantifiée en janvier 2023 (0,0045 Bq/kg frais). Enfin, pour les patelles, environ un tiers des activités de plutonium-238 sont significatives tous lieux de prélèvement confondus pour un maximum d'activité massique de 0,024 Bq/kg frais. Pour la mesure de plutonium-239+240, les activités massiques moyennes calculées sur la période 2021-2023 sont présentées sur la figure 33. Les mesures de plutonium sur les patelles prélevées par l'IRSN permettent d'estimer des ratios plutonium-238/plutonium-239+240 compris entre 0,16 et 1,5, qui sont caractéristiques des rejets industriels de La Hague.

S'agissant des crustacés, les détections d'actinides sont rares (de l'ordre de 5 %). Un marquage en octobre 2022 de plutonium-238 (0,041 Bq/kg frais) et de plutonium-239+240 (0,032 Bq/kg frais) a été détecté dans des homards prélevés sur la côte ouest du Cotentin. En janvier 2021 et janvier 2022, des activités significatives de plutonium-239 (respectivement

FIGURE 31 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE PLUTONIUM-239+240 DANS LES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

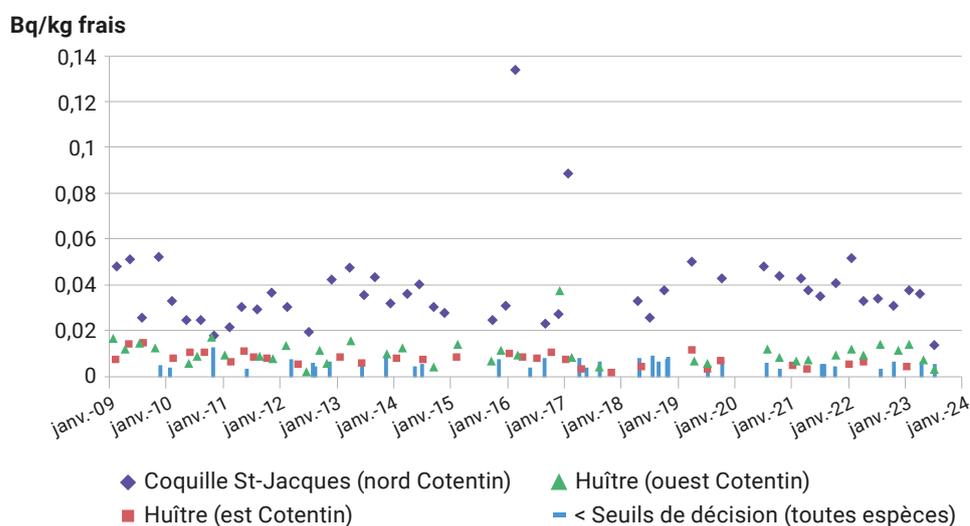


FIGURE 32 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE PLUTONIUM-238 DANS LES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

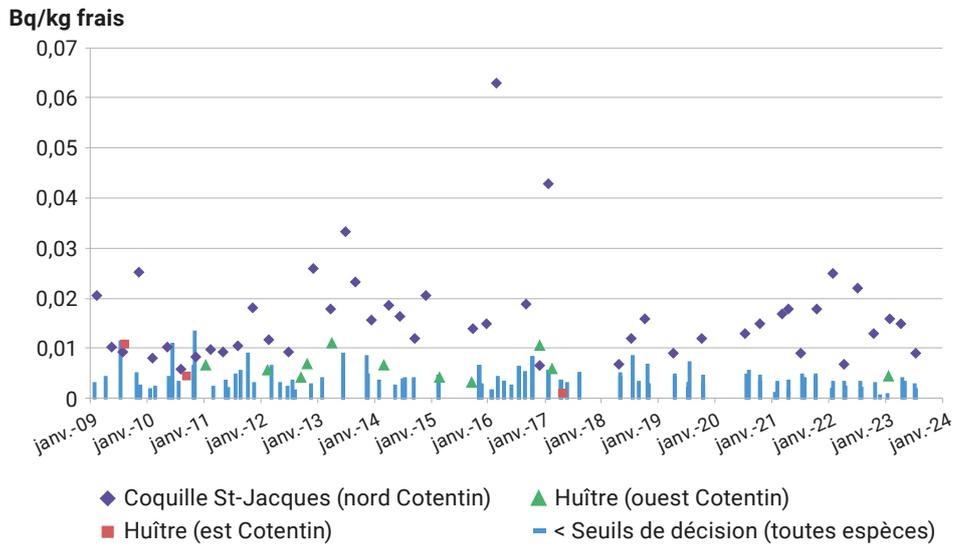
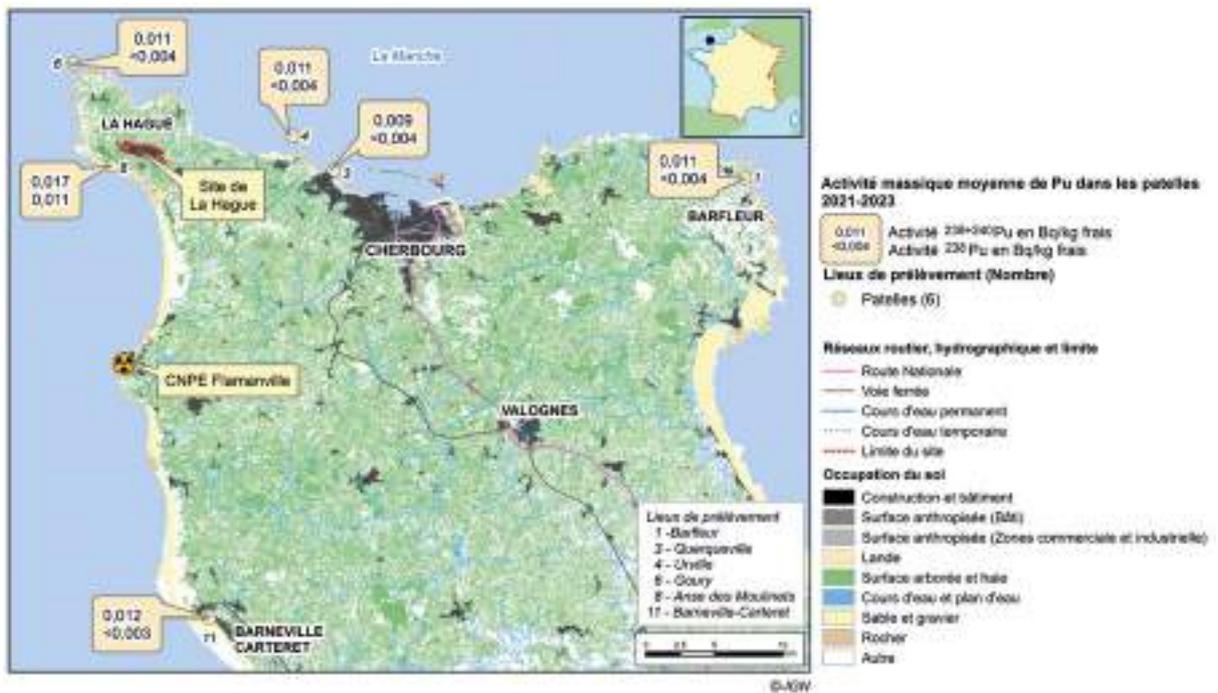


FIGURE 33 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES DE PLUTONIUM-239+240 ET DE PLUTONIUM-238 DANS LES PATELLES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)



0,0035 Bq/kg frais et 0,0038 Bq/kg frais) ont été mesurées sur des tourteaux prélevés sur la côte nord du Cotentin. En janvier 2022, une activité significative de plutonium-239+240 (0,009 Bq/kg frais) a été mesurée sur des tourteaux prélevés sur la côte ouest du Cotentin.

Entre 2021 et 2023, les activités de plutonium-239+240 et de plutonium-238 mesurées dans les poissons sont très majoritairement inférieures au seuil de décision (< 0,0025 Bq/kg frais), à l'exception d'un échantillon prélevé sur la côte est en janvier 2021 présentant une activité massique de 0,0041 Bq/kg frais de plutonium-239+240 et d'échantillons prélevés sur la côte nord du Cotentin en octobre 2021 et avril 2022 présentant respectivement une activité massique de 0,0041 Bq/kg frais et de 0,0036 Bq/kg frais en plutonium-239+240.

De 2021 à 2023, l'américium-241 a pu être quantifié dans plusieurs échantillons de coquilles Saint-Jacques (de 0,06 à 0,1 Bq/kg frais) et de patelles (de 0,01 à 0,16 Bq/kg frais).

La dose potentiellement due à l'ingestion de denrées locales marquées par les isotopes du plutonium (239, 240 et 238) rejetés par l'usine de La Hague est estimée à 0,04 µSv/an. Cette dose a été évaluée pour un adulte, en considérant exclusivement l'ingestion de denrées marines de type mollusques du régime alimentaire retenu (tableau 5 : population vivant dans le nord Cotentin et dont le chef de famille est pêcheur), étant donné que ce sont les seuls produits qui présentent un marquage régulier au fil du temps. Cette dose est équivalente à celle évaluée dans le bilan radiologique 2018-2020.

Enfin, l'influence des rejets liquides de plutonium de La Hague est également visible dans les sédiments et les algues. Dans les sédiments marins et sur cette même période (tableau 3), les activités massiques moyennes vont de 0,33 Bq/kg sec à Barfleur à 0,86 Bq/kg sec dans la grande rade de Cherbourg pour le plutonium-239+240 et de 0,08 Bq/kg sec à Barfleur à 0,33 Bq/kg sec dans la grande rade de Cherbourg et dans l'anse Saint-Martin pour le plutonium-238.

L'américium-241 est quantifié dans pratiquement tous les sédiments marins prélevés sur la période 2021-2023. L'activité massique moyenne maximale calculée est de 1,85 Bq/kg sec dans l'anse Saint-Martin. Ponctuellement, le curium-244 est également quantifié dans les sédiments (15 % de valeurs supérieures au seuil de décision). L'activité maximale

mesurée est de 0,33 Bq/kg sec à l'anse Saint-Martin. Le rapport isotopique moyen entre le plutonium-238 et le plutonium-239+240, calculé à partir des activités mesurées sur les différents échantillons de sédiments, de 0,42, témoigne d'une origine industrielle (le rapport d'activité caractéristique du bruit de fond et correspondant aux retombées des essais nucléaires est de 0,03). Les activités mesurées dans les sédiments marins entre 2021 et 2023 pour ces radionucléides sont dans les gammes des activités observées pour la période 2018-2020.

Dans les algues, sur la période 2021 à 2023, les activités vont de < 0,028 (SD) à 0,29 Bq/kg sec pour le plutonium-239+240 et de < 0,023 (SD) à 0,21 Bq/kg sec pour le plutonium-238.

TABLEAU 3 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES DANS LES SÉDIMENTS MARINS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg sec)

Lieu de prélèvement	Activités massiques moyennes		
	²³⁸ Pu	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am
Anse des Moulinets	0,11	0,32	0,60
Écalgrain	0,15	0,40	0,83
Anse St-Martin	0,33	0,80	1,85
Grande rade de Cherbourg	0,33	0,86	1,74
Sciotot	0,14	0,34	0,58
Anse du Brick	0,22	0,66	1,39
Barfleur	0,08	0,33	0,48

Le ruthénium-106, le cobalt-60, le césium-137 et le strontium-90

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 l'usine de La Hague non seulement sur son environnement marin proche (côtes du nord Cotentin) mais aussi sur l'ensemble des côtes françaises de la Manche⁽⁴⁾. Toutefois, avec la baisse des rejets liquides de certains radionucléides commencée depuis la fin des années 1980, la plupart de ces radionucléides n'est quasiment plus décelée dans le cadre de la surveillance effectuée par Orano.

(4) 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 1 000 à 10 000 fois plus élevés que ceux des CNPE. Aujourd'hui, cet écart est plus faible.

Ruthénium-106⁽⁵⁾

La baisse des quantités rejetées et la période radioactive relativement courte du ruthénium-106 font qu'aujourd'hui, celui-ci n'est plus détecté dans les sédiments. Depuis 2021, il n'est détecté que dans moins de 10 % des patelles et des algues prélevées. L'activité massique maximale est de 1,4 Bq/kg frais en avril 2021 dans les patelles et de 3,9 Bq/kg sec en mars 2021 dans les algues. L'activité maximale dans les échantillons de coquilles Saint-Jacques prélevées sur la côte nord du Cotentin est de 0,91 Bq/kg frais en avril 2022.

Cobalt-60

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, il n'a été quantifié qu'une fois sur la période 2021-2023 dans un échantillon de patelles prélevées dans l'anse des Moulinets (activité massique de 0,15 Bq/kg frais en avril 2021).

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 (tableau 4).

Le cobalt-60 est encore régulièrement quantifié dans les sédiments prélevés autour de la rade de Cherbourg (avec une activité maximale de 1,65 Bq/kg sec) et de l'anse Saint-Martin (avec une activité maximale de 2,26 Bq/kg sec). Ces activités décroissent plus on s'éloigne vers la côte est du Cotentin avec une activité massique moyenne de 0,29 Bq/kg sec à l'anse du Brick et des activités massiques inférieures aux seuils de décision à Barfleur. Le cobalt-60 n'est pas quantifié dans les sédiments marins de la côte ouest du Cotentin sur la période 2021-2023.

Enfin, les activités dans les algues aux différents points de prélèvement vont de < 0,23 (SD) à 1,17 Bq/kg sec.

Césium-137⁽⁵⁾

Dans le compartiment terrestre, il apparaît qu'une zone située au nord-ouest de l'établissement de La Hague présente un marquage historique en césium-137. En effet, comme le montrent les analyses de terre qui ont été faites dans la zone du ruisseau des Landes en 2016 et 2017 (cf. *Bilan radiologique 2015-2017*, focus ruisseau des Landes), des activités massiques moyennes dans cette zone sont supérieures au bruit de fond. L'origine de ce marquage pourrait être liée à un apport de contamination par voie aérienne à la suite d'événements anciens. En particulier, l'entreposage

TABLEAU 4 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE COBALT-60 ET DE RUTHÉNIUM-106 DANS DES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS EN MANCHE ET ANALYSÉS DANS LE CADRE DES ÉTUDES CONFIAÉES À L'IRSN PAR EDF AUTOUR DES CNPE DE 2013 À 2022 (Bq/kg frais)

Le rapport indique le nombre de fois où le radionucléide a pu être quantifié, sur le nombre de mesurages (les autres résultats sont inférieurs aux seuils de décision).

CNPE d'EDF	Radio-nucléides	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Flamanville	⁶⁰ Co	0,03-0,04 (4/5)	0,017-0,029 (4/5)	0,027-0,030 (2/4)	0,009-0,041 (3/4)	0,017-0,041 (5/5)	0,045 (1/3)	0,028 (1/3)	0,016-0,025 (2/2)	-	0,0154 (1/3)
	¹⁰⁶ Ru	0,12-0,16 (3/5)	0,15 (1/5)	0,16-0,23 (2/4)	0,19-0,28 (2/4)	0,13-0,77 (4/5)	0,19-0,82 (3/3)	-	0,35 (1/2)	0,415 (1/3)	0,181-0,405 (2/3)
Paluel	⁶⁰ Co	0,02 (1/4)	0,02-0,07 (3/4)	0,04 (1/4)	-	-	0,01 (2/3)	-	0,0087 (1/1)	-	-
	¹⁰⁶ Ru	-	-	-	-	-	0,10-0,16 (2/3)	-	-	-	-
Penly	⁶⁰ Co	-	0,012 (1/4)	0,013 (1/4)	0,021 (1/4)	0,01 (1/2)	-	-	-	-	-
	¹⁰⁶ Ru	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gravelines	⁶⁰ Co	0,02-0,04 (4/5)	0,03 (1/2)	-	0,01 (1/2)	0,03 (1/2)	0,02 (1/2)	0,02 (1/2)	0,02 (1/2)	0,0134 (1/2)	-
	¹⁰⁶ Ru	-	-	-	-	-	0,04 (1/2)	-	-	-	-

(5) Par souci de simplification, seul le radionucléide père est mentionné dans le rapport.

de blocs en béton contenant des déchets sur les aires extérieures de la zone nord-ouest en 1974 et l'incendie survenu en janvier 1981 sur le silo 130 (dans lequel sont entreposés des déchets historiques) ont conduit à une dissémination de césium-137 dans cette zone.

Ce marquage est également quantifiable dans une moindre mesure à travers les points de surveillance réguliers qui sont faits par Orano dans l'herbe au nord-ouest du site : principalement le point de surveillance A15 à proximité de la résurgence du ruisseau des Landes, ainsi qu'en s'éloignant vers le nord au point A6 aux Acres (figure 34). Les échantillons d'herbes prélevés à ces deux points présentent quasiment toujours ou régulièrement des activités massiques supérieures au bruit de fond local pour ce type de matrice (< 0,4 Bq/kg sec à Flamanville). Pour les autres points de surveillance (figure 34), le césium-137 est sporadiquement détecté. On peut noter que sur la période 2021-2023, des activités significatives de césium-137 ont été mesurées à la ferme de Calais, au Thiébot, au hameau Ricard, au Pont Durand, aux monts Éperons et au Château d'eau de Beaumont. Contrairement à la période 2018-2020, les activités de césium-137 au point de prélèvement du hameau ès Clerges sont toutes inférieures aux seuils de décision.

Ces activités dans l'herbe sont toutefois suffisamment faibles pour qu'il n'y ait pas de transfert quantifiable au lait de vache. En effet, comme pour la période

2018-2020, tous les résultats pour ce type de matrice sont inférieurs au seuil de décision (< 0,04 Bq/L).

Concernant les denrées, les activités massiques sont pratiquement toutes inférieures aux seuils de décision à l'exception des prélèvements de champignons pour lesquels l'activité massique moyenne calculée entre 2021 et 2023 est de 0,65 Bq/kg frais.

Le césium-137 est également un radionucléide rejeté par voie liquide par l'usine de La Hague. Dans les denrées marines, les poissons prélevés sur les côtes du Cotentin présentent des activités massiques de césium-137 relativement stables (figure 35). Les activités entre 2021 et 2023 sont comprises entre 0,04 et 0,41 Bq/kg frais, avec une activité moyenne de 0,12 Bq/kg frais. Ces résultats sont proches du bruit de fond pour ce radionucléide dans les poissons marins (0,08 Bq/kg frais).

Sur la base des activités de césium-137 dans les poissons, les patelles et les champignons, la dose reçue par une personne qui consommerait régulièrement ces denrées provenant de La Hague et selon le scénario retenu est de l'ordre de 0,003 µSv/an. Cette dose est inférieure d'un facteur 4 à celle calculée dans le bilan radiologique précédent en raison de la baisse des activités mesurées dans les denrées terrestres notamment (toutes les activités sont inférieures aux seuils de décision).

FIGURE 34 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE CÉSIMUM-137 DANS LES HERBAGES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE ENTRE 2021 ET 2023 (Bq/kg sec)

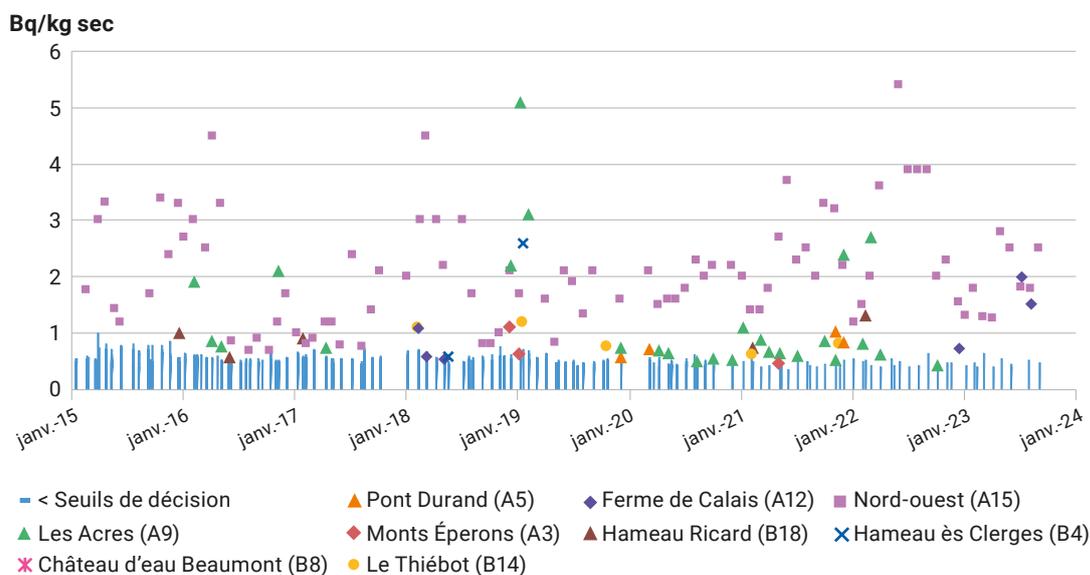
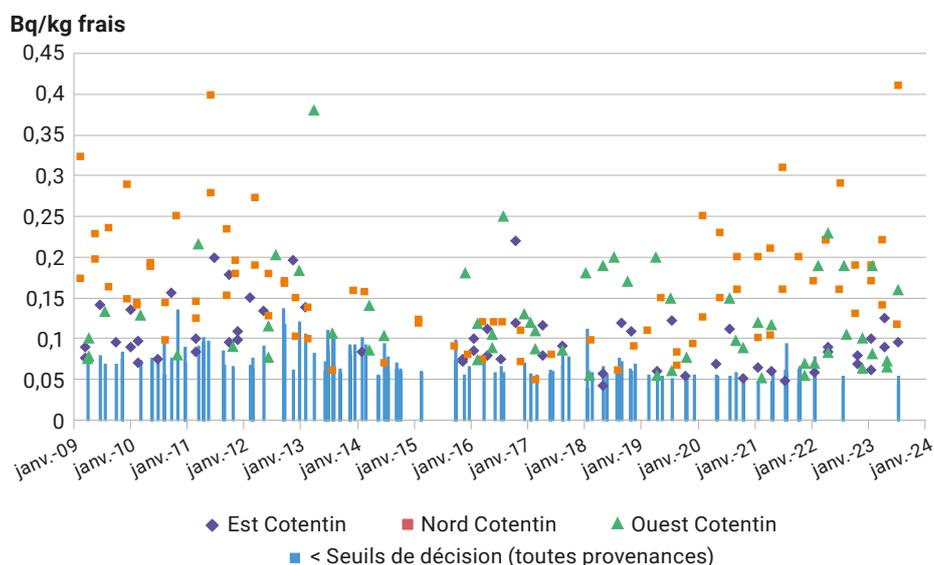


FIGURE 35 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE CÉSIUM-137 DANS LES POISSONS PRÉLEVÉS DANS LA MANCHE AUTOUR DE LA HAGUE ENTRE 2021 ET 2023 (Bq/kg frais)



Strontium-90

Le strontium-90 est l'un des principaux radionucléides issus des retombées des essais nucléaires atmosphériques. Également présent dans les effluents liquides de l'usine de La Hague, il fait partie des produits de fission rejetés en mer.

Dans le compartiment aquatique continental, les activités volumiques de strontium-90 dans les cours d'eau situés autour de l'usine de La Hague sont de l'ordre du bruit de fond dû aux lessivages des sols marqués par les retombées atmosphériques des essais nucléaires, soit < 10 mBq/L. Le ruisseau des Landes, qui s'écoule au nord-ouest du site de La Hague, présente des activités volumiques comprises entre 0,42 et 1,24 Bq/L (figure 36) entre 2021 et 2023. Les activités volumiques au niveau de la résurgence du ruisseau des Landes sont globalement du même ordre de grandeur que lors de la période 2018-2020 (figure 36). Il est à noter que depuis juillet 2018, Orano a ajouté à sa surveillance un prélèvement d'eau du ruisseau des Landes en aval de la zone humide, là où se forme le cours d'eau. Ce nouveau prélèvement situé à une centaine de mètres plus au nord de celui placé à la résurgence du ruisseau des Landes est réalisé au même endroit que celui de l'IRSN. Les activités de strontium-90 mesurées par Orano et l'IRSN à ces points de surveillance sont de l'ordre de 0,1 Bq/L.

Ces activités sont à mettre en relation avec le marquage en strontium-90 de la nappe phréatique alimentant

ce ruisseau à la suite d'un incident ayant eu lieu dans les années 1980 au cours duquel des fosses bétonnées où étaient entreposés des déchets en surface se sont dégradées et ont perdu leur étanchéité. Ces déchets ont depuis été repris.

Dans le lait de vache prélevé dans les cinq fermes situées sur les communes de Beaumont-Hague, Digulleville, Herqueville et Jobourg, environ 90 % des activités sont supérieures aux seuils de décision (figure 37). La ferme située à Beaumont-Hague présente l'activité volumique moyenne la plus élevée sur la période 2021 à 2023 (0,06 Bq/L). Les autres fermes présentent un marquage en strontium-90 dont les activités volumiques moyennes sont comprises entre 0,03 et 0,044 Bq/L. Ces activités sont très proches de celles du dernier bilan 2018-2020.

Dans les autres denrées prélevées, les activités de strontium-90 ne dépassent pas les seuils de décision dans les prélèvements de pommes de terre. En revanche, le strontium-90 présente des activités massiques moyennes de 0,15 Bq/kg frais dans les lapins et de 0,12 Bq/kg frais dans les œufs de la commune d'Omonville-la-Petite. Dans les blés de la commune de Digulleville, une activité massique de 0,241 Bq/kg sec a été mesurée en août 2022.

La dose reçue par un adulte qui consommerait ces denrées, selon un taux de consommation moyen, est de l'ordre de 0,002 µSv/an.

FIGURE 36 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE STRONTIUM-90 DANS LES RUISSEAUX AUTOUR DE LA HAGUE (données IRSN) (Bq/L)

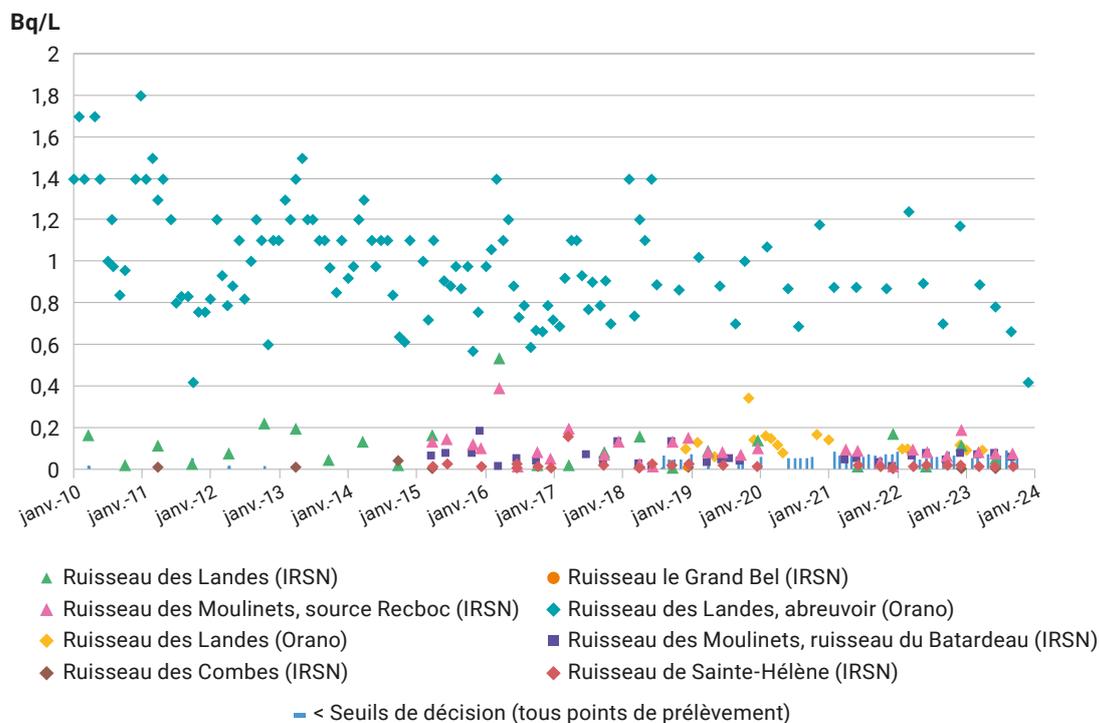
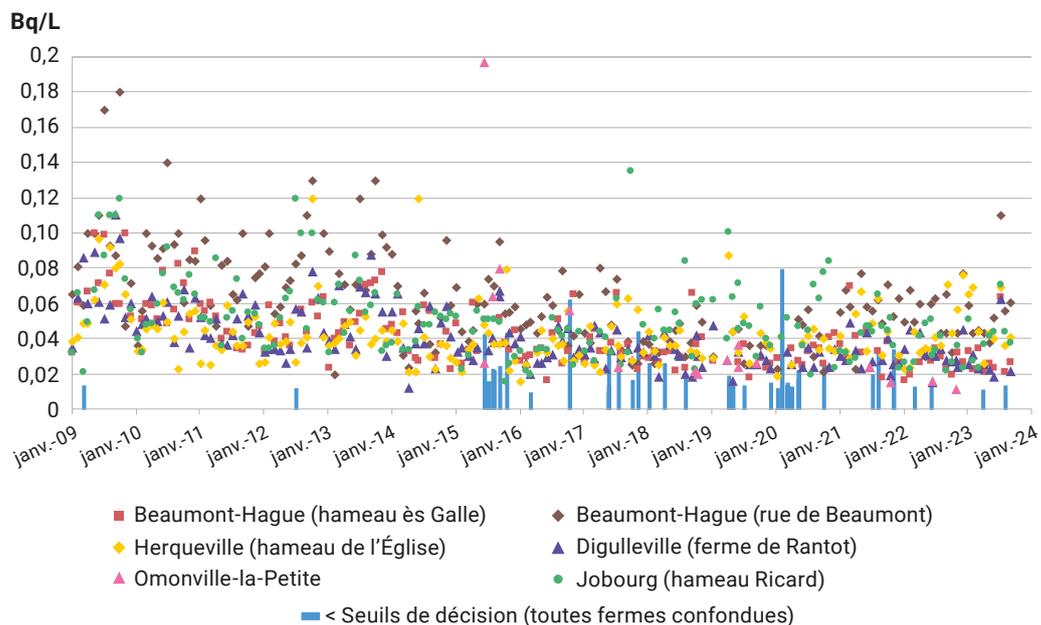


FIGURE 37 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE STRONTIUM-90 DANS LE LAIT PRÉLEVÉ AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS 2009 (Bq/L)



Synthèse de l'évaluation des doses

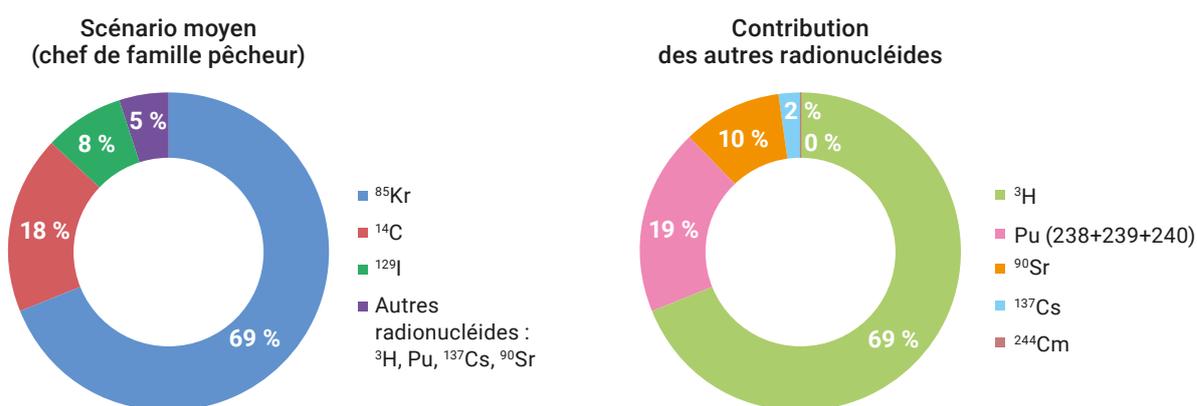
Hormis le tritium dont la dose liée à l'inhalation ou à l'ingestion est extrêmement faible malgré les quantités importantes rejetées dans l'environnement, les trois radionucléides les plus rejetés par le site de La Hague par voies liquide et/ou atmosphérique, le krypton-85, le carbone-14 et l'iode-129, contribuent majoritairement à la dose reçue par la population (figure 38).

Si l'on considère un groupe de référence, positionné virtuellement autour du site, qui respirerait un air dont l'activité volumique de chaque radionucléide est une valeur moyenne des mesures relevées en différents points autour du site et qui consommerait des denrées⁽⁶⁾ locales selon le scénario retenu d'une personne vivant dans le nord Cotentin et dont le chef de famille est pêcheur (tableau 5), la dose efficace totale reçue serait de 3,5 µSv/an. La contribution du krypton-85 à cette dose efficace totale serait d'environ 69 % de par l'exposition externe qu'il occasionne. Les contributeurs secondaires seraient le carbone-14 (18 %) et l'iode-129 (8 %) principalement par l'ingestion de denrées locales. Les 5 % restant de la dose totale résulteraient du tritium, suivi par le strontium-90, puis les plutoniums (238 et 239+240) et enfin par le césium-137.

Le scénario retenu pour évaluer les doses reçues par la population dans le cadre du bilan radiologique 2021-2023 tend à être représentatif d'un régime alimentaire moyen pour une population vivant dans le nord Cotentin. Afin de disposer d'évaluations de dose plus pénalisantes, deux régimes alimentaires ont été proposés en 1999 dans le cadre de l'étude faite par le Groupe radioécologie Nord-Cotentin (GRNC). Il s'agit d'un pêcheur de la zone des Huquets habitant à Jobourg qui consomme régulièrement des produits de la mer locaux et d'un agriculteur habitant au Pont Durand près de Digulleville dont la consommation en légumes racines et en laitage produits localement est importante. Le taux d'autoconsommation de ces deux régimes alimentaires est le même. Les quantités de denrées locales consommées annuellement qui prennent en compte ce taux d'autoconsommation sont présentées dans le tableau 5.

En fonction du régime alimentaire choisi, de gros écarts peuvent apparaître sur la quantité consommée de certains produits. C'est le cas notamment pour les produits de la mer pour les pêcheurs ou pour les produits laitiers pour les agriculteurs. La dose efficace qui est ensuite calculée en considérant l'ingestion de denrées locales est par conséquent variable (figure 39).

FIGURE 38 / RÉPARTITION DE LA DOSE EN FONCTION DU RADIONUCLÉIDE MESURÉ DANS L'ENVIRONNEMENT POUR UN GROUPE DE RÉFÉRENCE POSITIONNÉ VIRTUELLEMENT



(6) L'activité moyenne de chaque radionucléide calculée sur l'ensemble des denrées prélevées autour du site est retenue.

TABLEAU 5 / QUANTITÉ DE DENRÉES LOCALES CONSOMMÉES

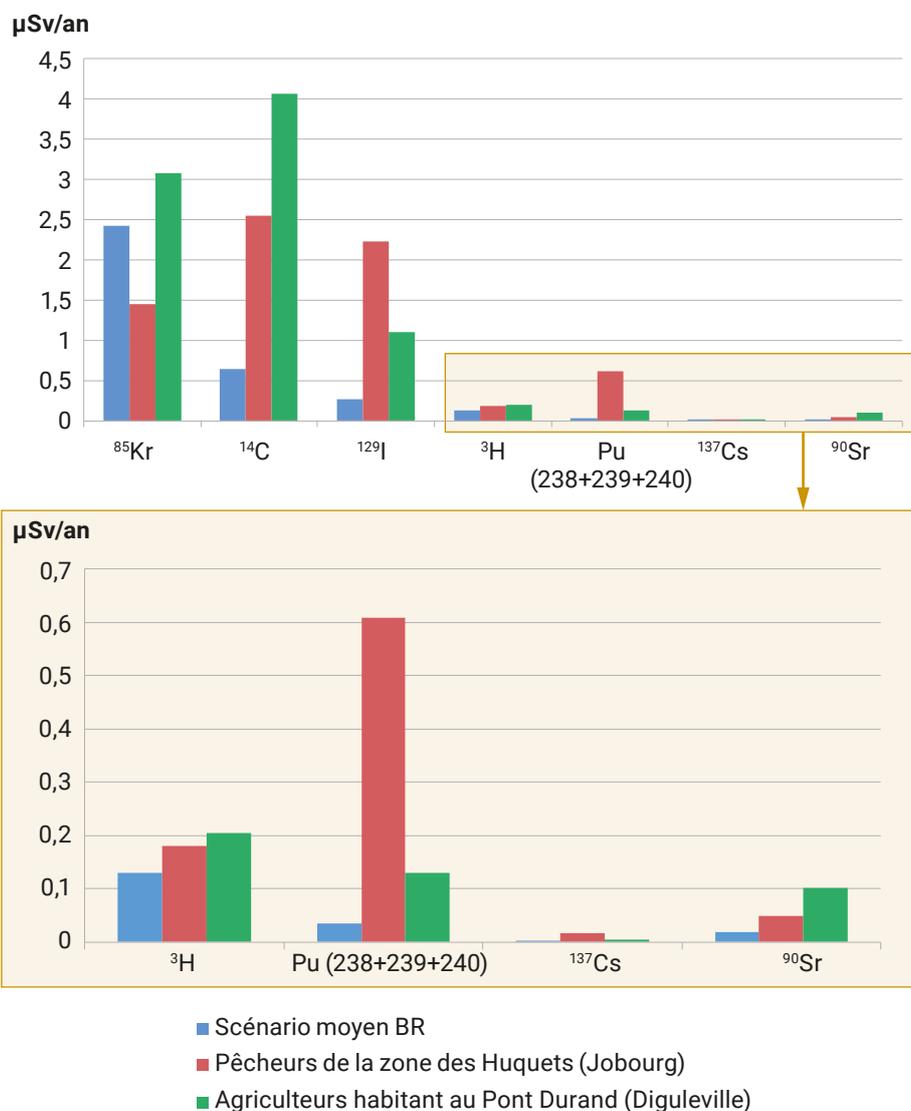
Aliments	Pêcheur de la zone des Huquets	Agriculteur habitant au Pont Durand	Scénario moyen BR : personne vivant à proximité du site et dont le chef de famille est pêcheur
	Ration alimentaire (kg/an ou L/an pour le lait et l'eau)		
Crustacés	32,3	6,9	1,8
Mollusques	23,3	5,3	2,7
Poissons	35,5	12,2	5,9
Lait	75,6	184,1	8,0
Produits laitiers*	9,9	23,4	10,2*
Viande de moutons	1,1	1,1	0,6
Volailles	10,8	15,1	3,2
Viande de lapins	2,0	2,8	0,9
Œufs	9,6	20	3,9
Légumes feuilles	14,4	33	2,0
Légumes racines	78,6	159	21,2
Confitures	3,4	8,4	0,5
Fruits			2,9
Miel			0,2
Eau			720

* Inclus les yaourts et le fromage blanc, le fromage de vache et la matière grasse animale (beurre).

Les doses calculées selon ces trois scénarios sont comprises entre 3,5 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour le scénario retenu pour le bilan radiologique et 8,7 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un agriculteur habitant au Pont Durand près de Digulleville. Pour ce dernier, la contribution du carbone-14 à la dose due à l'ingestion de denrées locales constitue la voie principale d'exposition (47 %) alors que la contribution du krypton-85 est de 35 %. Pour un pêcheur habitant à Jobourg, la dose efficace totale est estimée à 7,1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. À noter que pour ce pêcheur, le carbone-14 (36 %) et l'iode-129 (31 %) sont les contributeurs principaux pour la dose du fait des quantités ingérées en denrées marines locales.

Ces estimations fondées sur des activités moyennes calculées à partir de résultats de mesures issues de la surveillance de l'environnement sont cohérentes avec celles réalisées par Orano pour l'année 2022 sur la base des rejets réels. En effet, Orano a estimé une dose efficace potentiellement reçue par un pêcheur de Goury à 4,68 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ et à 9,91 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, celle reçue par un agriculteur de Digulleville.

FIGURE 39 / ÉVALUATION DES DOSES REÇUES PAR LA POPULATION RÉSIDANT À PROXIMITÉ DE LA HAGUE PAR RADIONUCLÉIDE DÉCELÉ DANS L'ENVIRONNEMENT SELON DIFFÉRENTS SCÉNARIOS



Bilan

Les activités mesurées dans l'environnement de La Hague entre 2021 et 2023 sont conformes à celles attendues du fait des rejets autorisés. Elles s'inscrivent par ailleurs 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. Ils sont également les principaux contributeurs à la dose reçue par la population avoisinante.

FOCUS
ACTIVITÉS DE CARBONE-14 ET DE TRITIUM
DANS LES AJONCS
AUTOUR DU SITE DE LA HAGUE

Afin de disposer d'une connaissance plus précise des niveaux de radioactivité dans l'environnement du site de La Hague, en particulier dans le compartiment terrestre, et de mieux caractériser les zones potentiellement influencées par les rejets radioactifs du site, l'RSN a réalisé entre 2018 et 2021 plusieurs campagnes de

prélèvements en complément de la surveillance régulière. L'objectif était également de disposer d'un référentiel de l'état radiologique de l'environnement du site utile en cas d'évènement nucléaire ou radiologique. Dans ce cadre, trois missions de prélèvements ont été organisées en juillet 2018, juillet 2019 et juin 2021 afin de couvrir le territoire jouxtant les sites d'Orano Recyclage de La Hague et du centre de stockage de déchets radioactifs de l'Andra. Elles ont donné lieu à des prélèvements dans le compartiment aquatique continental (eaux, sédiments, végétaux aquatiques) et dans le compartiment terrestre (sols, herbe et ajoncs) ainsi que des mesures par spectrométrie gamma *in situ*.

Les prélèvements effectués dans le cadre de la surveillance régulière ont pour objectif, en plus de détecter les élévations anormales de la radioactivité et de contribuer à la connaissance de l'état radiologique de l'environnement. Mais ils sont soumis aux contraintes de moyens et sont limités à quelques indicateurs et à leur disponibilité sur le territoire.

Afin de mieux caractériser l'influence des rejets atmosphériques de l'usine Orano La Hague dans le compartiment terrestre et la variabilité spatiale des activités de carbone-14 et de tritium qui en résulte, l'IRSN a réalisé une étude spécifique sur des prélèvements d'ajonc d'Europe (*Ulex europaeus*). Cette espèce d'arbuste épineux à feuillage persistant est présente sur l'ensemble de la pointe du Cotentin. Au total, 31 prélèvements d'ajoncs ont été réalisés dans un rayon de 5 km autour du site, en se limitant aux quinze derniers centimètres de chaque rameau qui correspondent à une période de croissance d'une année dans la région de La Hague (figure 1). Cette étude a également permis de comparer les résultats avec ceux issus d'une campagne menée par l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN⁽¹⁾) à la fin des années 1990.

FIGURE 1 / LOCALISATION DES PRÉLÈVEMENTS D'AJONCS RÉALISÉS AUTOUR DU SITE ORANO DE LA HAGUE ENTRE 2018 ET 2021



(1) L'Institut de protection et de sûreté nucléaire est devenu l'IRSN en 2002 après sa fusion avec l'Office de protection contre les rayonnements ionisants (OPRI).

La figure 1 illustre également les zones situées sous les vents dominants qui proviennent majoritairement de l'ouest et du sud-ouest dans cette région. Une analyse des données météorologiques montre que les vents dominants viennent des secteurs sud-ouest et est-nord-est par temps sec et du secteur sud-ouest par temps de pluie. Les cercles à 1, 2 et 5 km, représentent la distance par rapport au centre du site qui correspond approximativement à la localisation des trois principaux émissaires de rejets gazeux du site (UP2-400, UP2-800 et UP3).

Compte tenu de la configuration géographique de la zone, l'environnement terrestre autour de l'usine de retraitement de La Hague est potentiellement influencé par les retombées atmosphériques des rejets d'effluents gazeux de l'usine, celles issues de la rémanence des essais atmosphériques d'armes nucléaires et, dans une moindre mesure, par les aérosols marins (embruns) porteurs des radionucléides initialement rejetés en mer. Sur la période de l'étude (2018-2021), les principaux radionucléides rejetés dans l'atmosphère, hors krypton-85, sont le tritium et le carbone-14 puis, avec des niveaux d'activités plus faibles, l'iode-129 et le ruthénium-106. Ces quatre radionucléides sont également prépondérants dans les effluents liquides rejetés en mer.

Sur l'ensemble des analyses de tritium organiquement lié à la matière organique (TOL) dans les prélèvements d'ajoncs, les résultats font apparaître un marquage de tritium qui diminue avec la distance au site. La gamme d'activités mesurées est comprise entre $2,8 \pm 0,7$ Bq/L_{ec} (0,5 Bq/kg frais) à plus de 2 km du site dans le secteur ouest et $17,6 \pm 0,9$ Bq/L_{ec} (3,8 Bq/kg frais) à proximité de la clôture du site dans le secteur sud-ouest. L'activité moyenne est de 6,2 Bq/L_{ec} (1,2 Bq/kg frais), ces activités sont toutes supérieures à la gamme d'activités liée au bruit de fond de tritium sur la période de 0,37 à 2,2 Bq/L (moyenne de 0,9 Bq/L dans le compartiment terrestre) (figure 2).

Les activités de tritium organiquement lié les plus élevées ont été mesurées dans les échantillons prélevés en bordure de site au sud/sud-ouest de l'usine de La Hague. Néanmoins, il est à noter qu'une grande partie de la zone située en bordure nord du site (propriété d'Orano) n'est pas accessible et n'a pas pu être échantillonnée. On peut également observer sur la figure 2, que les zones les plus marquées se situent au sud-ouest et au nord-est du site et correspondent à un marquage suivant l'axe des vents dominants par rapport aux points de rejets atmosphériques du site. Par ailleurs, les activités mesurées ont tendance à diminuer de façon significative en dehors de la zone influencée par les vents dominants et à plus de deux kilomètres du site, avec des activités proches de 3 Bq/L_{ec} (0,6 Bq/kg frais).

L'analyse des activités de tritium permet ainsi d'identifier un gradient lié à la distance au site et à l'influence des vents dominants mais également de mettre en évidence l'influence des rejets liquides sur le compartiment terrestre en lien avec la remise en suspension en bord de mer et le transport *via* les embruns. On retrouve de ce fait un gradient qui s'inverse avec la proximité de la côte et des activités de tritium organiquement lié plus importantes en bord de mer que celles mesurées dans les terres comme cela a pu être observé sur les prélèvements réalisés à l'est au niveau du nez de Jobourg ($5,2 \pm 0,8$ Bq/L_{ec}) et au nord au niveau du cap de La Hague ($3,5 \pm 0,7$ Bq/L_{ec}) ou de l'anse Saint-Martin ($5,2 \pm 0,8$ Bq/L_{ec}).

L'influence des rejets atmosphériques de l'usine de La Hague sur le compartiment terrestre est également visible au travers des activités de carbone-14 par unité de masse de carbone mesurées sur les ajoncs. Si on considère un bruit de fond moyen de carbone-14, incluant les retombées des essais nucléaires, de l'ordre de 224,5 Bq/kg de C sur la période 2018-2021, l'ensemble des activités mesurées est supérieur au bruit de fond voire le dépasse très largement pour les prélèvements d'ajoncs réalisés en bordure de site (figure 3). Les activités spécifiques de carbone-14 varient entre 230 ± 11 Bq/kg de C et 1960 ± 94 Bq/kg de C pour une activité moyenne de 453 Bq/kg C (221 Bq/kg sec).

FIGURE 2 / ACTIVITÉS DE TRITIUM LIÉ À LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LES PRÉLÈVEMENTS D'AJONCS RÉALISÉS AUTOUR DE L'USINE DE LA HAGUE (Bq/L d'eau de combustion)



FIGURE 3 / ACTIVITÉS SPÉCIFIQUES DE CARBONE-14 DANS LES PRÉLÈVEMENTS D'AJONCS RÉALISÉS AUTOUR DE L'USINE DE LA HAGUE (Bq/kg de carbone)



On retrouve une répartition géographique des activités de carbone-14 similaire à celle du tritium avec les activités les plus importantes mesurées au niveau de la bordure du site dans l'axe des vents dominants. On distingue également l'influence de la distance au site sur les activités de carbone-14, seul l'effet de l'apport par les embruns semble moins marqué pour le carbone-14 par rapport au tritium. Cela pouvant s'expliquer des activités de tritium rejetées en mer, beaucoup plus importantes que pour le carbone-14.

On peut également noter que l'activité de carbone-14, de 324 Bq/kg de C, mesurée à la clôture au niveau du point le plus à l'ouest du site est beaucoup plus faible que celle attendue au regard de l'activité de tritium mesurée sur ce point (17,6 Bq/L_{ec}). Certains échantillons ont également été analysés par spectrométrie gamma afin de rechercher d'autres radionucléides présents dans le spectre de rejets de l'usine de retraitement de La Hague. Seules trois valeurs significatives d'iode-129 dans des échantillons prélevés en bordure de site (maximum 1,6 ± 0,6 Bq/kg sec) ont été mesurées et aucun autre radionucléide d'origine artificielle n'a été mis en évidence à l'occasion de cette campagne.

La comparaison de ces résultats avec ceux des analyses réalisées à la fin des années 1990 (tableau 1), permet de constater que les activités mesurées dans les ajoncs ont diminué pour les radionucléides émetteurs gamma et que hormis quelques mesures significatives d'iode-129, les activités de ruthénium-106, de cobalt-60 et de césium-137 sont aujourd'hui inférieures aux seuils de décisions. Ces données sont issues d'une étude menée par l'IPSN, en collaboration avec le Groupe d'études atomiques (GEA) de la Marine nationale à la fin des années 1990 en vue de discriminer les différentes voies de transfert des radionucléides dans l'environnement pour, à terme, caractériser les dépôts liés aux rejets du site de La Hague.

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS MINIMALES, MOYENNES ET MAXIMALES MESURÉES LORS DES TROIS CAMPAGNES DE PRÉLÈVEMENTS D'AJONCS MENÉES PAR L'IPSN À LA FIN DES ANNÉES 1990

Radio-nucléide	Unité	Campagne 1997			Campagne 1998			Campagne 1999		
		Min.	Moyenne	Max.	Min.	Moyenne	Max.	Min.	Moyenne	Max.
¹²⁹ I	Bq/kg sec	0,6	10,4	74,5	0,4	3,3	24,3	0,2	2,0	9,3
¹⁰⁶ Ru-Rh		2,1	4,4	7,2	2,2	9,0	60,0	6,7	11,0	21,0
⁶⁰ Co		0,1	0,3	0,9	0,1	0,5	1,2	0,2	0,3	0,6
¹³⁷ Cs		0,1	0,4	1,7	0,1	0,3	1,6	0,1	0,4	0,9
³ H TOL	Bq/L _{ec}	4,0	9,4	51,9	3,1	9,4	54,6	-	-	-
¹⁴ C	Bq/kg de C	256,7	335,6	464,7	258,8	339,8	587,1	250,5	30,6	530,0

Des activités significatives pour les principaux émetteurs gamma (¹²⁹I, ¹⁰⁶Ru, ⁶⁰Co et ¹³⁷Cs), hors krypton-85, présents dans le spectre de rejets étaient ainsi régulièrement mesurées à la fin des années 1990 dans les végétaux terrestres prélevés autour du site de La Hague. Cette baisse des niveaux d'activités se retrouve dans la diminution des rejets atmosphériques en émetteurs gamma visible notamment pour l'iode-129 (figure 6). À l'inverse, les activités de tritium et de carbone-14 ont augmenté au début des années 1990 et sont restées relativement stables depuis, ce qui explique que les niveaux d'activités dans les ajoncs soient restés proches et n'ont que peu diminué entre les années 1990 et aujourd'hui si on exclut les mesures réalisées en bordure de site (figures 4 et 5).

Sur l'ensemble des campagnes réalisées par l'IPSN, l'activité moyenne s'élevait à 9,4 Bq/L_{ec} pour le tritium organiquement lié et à 337 Bq/kg de C pour le carbone-14.

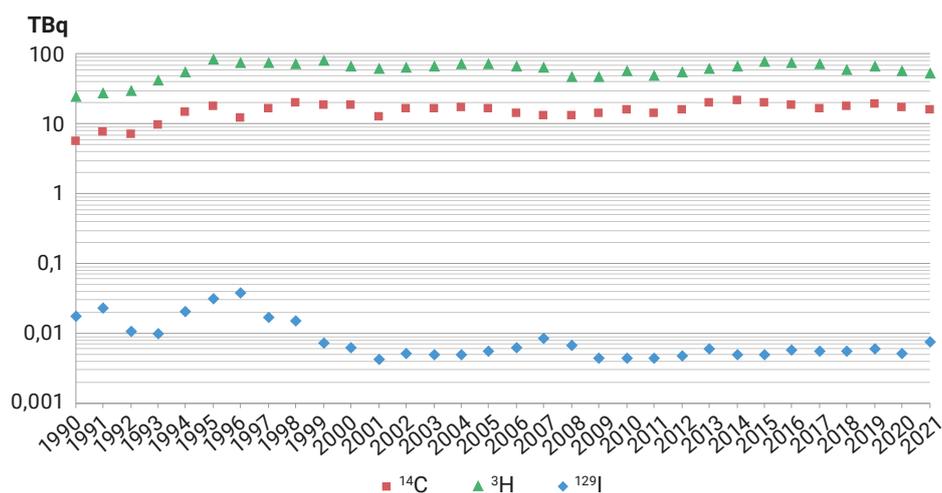
FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE TRITIUM LIÉ À LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LES PRÉLÈVEMENTS D'AJONCS RÉALISÉS AUTOUR DE L'USINE DE LA HAGUE (campagnes 1997-1998) (Bq/L d'eau de combustion)



FIGURE 5 / ACTIVITÉS SPÉCIFIQUE DE CARBONE-14 DANS LES PRÉLÈVEMENTS D'AJONCS RÉALISÉS AUTOUR DE L'USINE DE LA HAGUE (campagnes 1997-1998-1999) (Bq/kg de carbone)



FIGURE 6 / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DE TRITIUM, DE CARBONE-14 ET D'IODE-129 REJETÉES DANS LES EFFLUENTS GAZEUX DEPUIS 1990 (TBq/an)



Les résultats de cette campagne de prélèvements d'ajoncs ont permis de mieux caractériser la répartition des activités de tritium et de carbone-14 dans le compartiment terrestre de l'environnement du site de La Hague en complément des données qui peuvent être acquises par l'IRSN dans le cadre de la surveillance régulière. Les résultats font ainsi apparaître un marquage en tritium et en carbone-14 qui diminue avec la distance au site. On peut également constater que dès lors qu'on s'éloigne de quelques kilomètres du site et qu'on se situe en dehors de l'influence des vents dominants, les activités mesurées diminuent fortement et se rapprochent du bruit de fond.

Bien qu'elle reste présente sur l'ensemble de la pointe du Cotentin, l'influence des rejets de l'usine Orano de La Hague reste donc limitée géographiquement aux territoires des communes d'Herqueville, d'Omonville-la-Petite et de Digulleville et au sud de la commune de Jobourg.

Les campagnes complémentaires ont également été l'occasion pour l'IRSN de réaliser des prélèvements de sols et des mesures par spectrométrie gamma *in situ* afin de disposer d'un référentiel de l'état radiologique de l'environnement du site de La Hague ainsi que de caractériser les différents cours d'eau en complément des investigations menées au niveau du ruisseau des Landes (cf. focus du *Bilan radiologique* 2015-2017, pp. 308-313).

Afin de compléter la connaissance sur les niveaux d'activités mesurés dans les denrées alimentaires et d'acquérir des données complémentaires en vue de renforcer le volet calculs de doses réalisé dans le cadre du *Bilan radiologique*, les campagnes complémentaires vont se poursuivre en 2024 avec l'organisation d'une campagne spécifique sur ce dernier volet qui sera l'occasion d'associer les acteurs locaux notamment les représentants des Commissions locales d'information (CLI).

Le centre de stockage de l'Aube et le centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage de Morvilliers

Implanté sur les communes de Soulaines-Dhuys, La Ville-aux-Bois et Épothémont, dans le département de l'Aube (figure 1), le centre de stockage de l'Aube (CSA), 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 (CSM ; cf. p. 124). Le CSA est autorisé à accueillir 1 million de m³ de colis de déchets radioactifs. À fin 2023, 37,9 % de cette capacité autorisée de stockage étaient atteints.

Les déchets FMA-VC sont majoritairement des petits équipements contaminés lors des maintenances (gants, vêtements, outils...) et de l'exploitation d'installations nucléaires françaises (traitement d'effluents liquides ou gazeux). Ils proviennent également d'hôpitaux, de laboratoires de recherche d'universités... ou d'opérations d'assainissement et de démantèlement.

Les déchets sont conditionnés dans des colis (fûts, caissons) en béton ou métalliques avant d'être stockés

au CSA en surface dans des ouvrages en béton armé, ouverts sur leur sommet. L'opération de stockage s'effectue à l'abri de la pluie, sous des charpentes métalliques mobiles installées sur rail (figure 2). Une fois remplis, les ouvrages sont fermés par une dalle en béton et l'étanchéité de l'ouvrage est assurée par un revêtement imperméable.

Le CSA dispose d'un atelier de conditionnement des déchets. Cet atelier est composé d'une unité d'injection permettant de bloquer et de confiner dans un mortier certains déchets volumineux livrés par les producteurs sans matériau d'enrobage et d'une unité de compactage permettant de réduire le volume de déchets.

Implanté à quelques kilomètres du CSA, sur les communes de Morvilliers et de La Chaise, le centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) est une Installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE), dédiée au stockage des déchets de très faible activité (TFA) depuis 2003 (figure 3). Ce centre de stockage est autorisé à accueillir 650 000 m³ de déchets radioactifs. En 2023, 72,2 % de cette capacité totale de stockage autorisée étaient atteints.

Les déchets TFA sont essentiellement des gravats, des terres, des ferrailles... très faiblement contaminés.

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

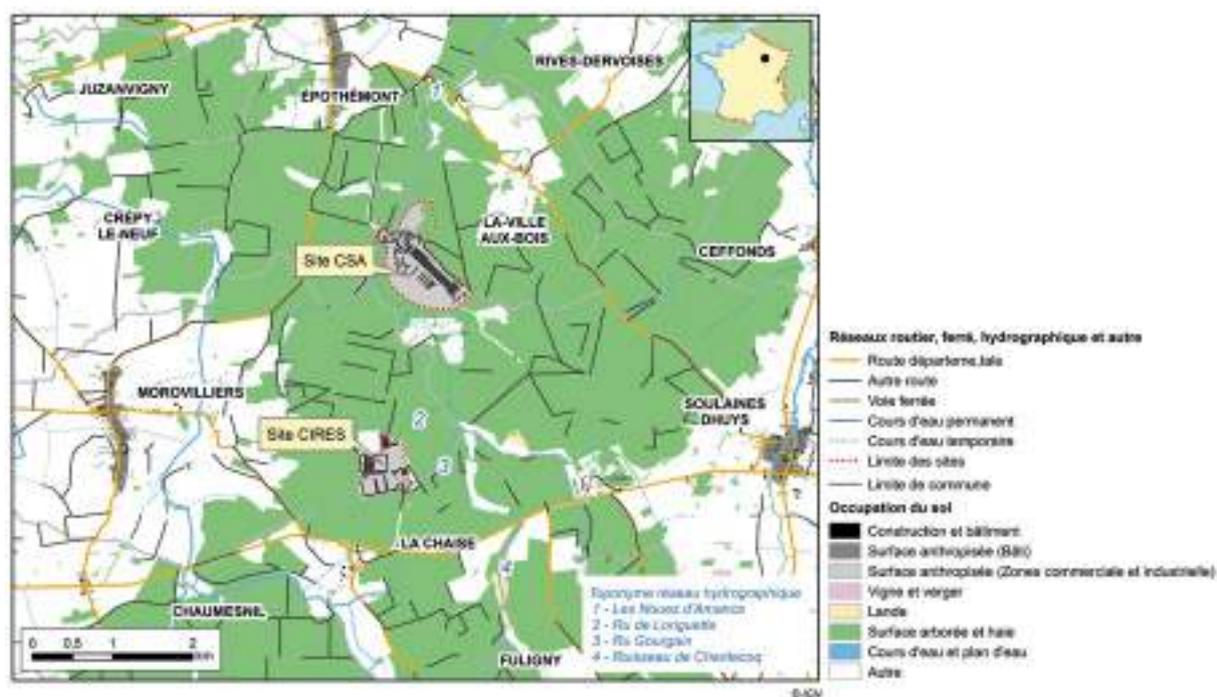


FIGURE 2 / LE CENTRE DE STOCKAGE DE L'AUBE (CSA)



© Andra

FIGURE 3 / LE CENTRE INDUSTRIEL DE REGROUPEMENT, D'ENTREPOSAGE ET DE STOCKAGE (Cires)



© Andra

Ils sont issus du démantèlement ou de l'exploitation d'installations nucléaires ou d'industries classiques utilisant des matériaux naturellement radioactifs. Ces déchets peuvent également provenir de l'assainissement et de la réhabilitation d'anciens sites pollués par la radioactivité.

Le Cires dispose d'un bâtiment de traitement des déchets TFA permettant de réduire le volume de déchets compactables.

Les déchets TFA sont stockés au Cires dans des alvéoles creusées dans l'argile et, une fois remplies, fermées par une couverture composée notamment d'une membrane de polyéthylène haute densité et d'une enveloppe de matériaux naturels argileux. Ces opérations s'effectuent à l'abri de la pluie sous des toits mobiles.

Depuis 2012, le Cires accueille également des activités de regroupement et d'entreposage de déchets radioactifs. Les déchets regroupés sur le centre sont issus de la collecte auprès d'environ 1 000 producteurs non électronucléaires répartis sur l'ensemble du territoire national (hôpitaux, laboratoires pharmaceutiques, particuliers...). Ces déchets sont de nature très variée : gants, plastiques, solvants, blouses, paratonnerres, détecteurs de fumées, etc. La majeure partie de ces déchets sont des TFA ou des FMA-VC pour lesquels des filières de stockage existent. Une petite partie de ces déchets sont de faible ou moyenne activité à vie longue ; ils ne disposent pas encore de solutions de stockage et font l'objet d'un entreposage sur le site, dans l'attente de la détermination d'une filière d'élimination. Depuis 2016, le Cires exploite également une installation dédiée au tri et au traitement de ces déchets issus d'activités non électronucléaires et regroupés sur le site.

Les rejets radioactifs

Rejets radioactifs du CSA

Les opérations de conditionnement des déchets sont à l'origine des effluents radioactifs gazeux rejetés par la cheminée de l'atelier de conditionnement des déchets. Ces effluents sont canalisés à la source grâce à la ventilation nucléaire. Des filtres très haute efficacité (THE) sont en place dans les conduits de ventilation de façon à épurer, le cas échéant, les poussières et aérosols présents dans les effluents. Les radionucléides non retenus par les filtres et donc susceptibles d'être rejetés dans l'atmosphère sont le tritium, les iodes radioactifs et le carbone-14.

La surveillance des éléments gazeux, poussières et aérosols est effectuée avant rejet dans l'atmosphère. Celle-ci a pour objectif de quantifier les rejets à

l'environnement ; cette quantification est possible grâce à la réalisation de prélèvements continus avec mesures différées en laboratoire, couplée à la mesure du débit d'air rejeté.

Une fraction représentative de l'air rejeté est prélevée dans la gaine de ventilation et piégée au travers de filtres (poussières – mesure des indices d'activités alpha et bêta globaux et émetteurs alpha et bêta-gamma), de cartouches à charbon actif (permettant le piégeage des iodes-125, 129 et 131) et de barboteurs (piégeant le tritium et le carbone-14).

Ces rejets canalisés sont soumis par arrêté à des valeurs limites. Depuis 2006, les rejets annuels gazeux de tritium du CSA varient de 0,054 à 7,3 GBq (figure 4).

Les effluents liquides produits dans les installations et susceptibles d'être contaminés sont collectés dans plusieurs réservoirs sur le site puis contrôlés (tritium, carbone-14, émetteurs alpha et bêta-gamma), avant rejet éventuel dans le bassin d'orage *via* un réseau spécifique ; le bassin d'orage est le seul récepteur des effluents liquides du CSA avant le rejet vers le milieu naturel, dans le ruisseau des Noues d'Amance. Au cours de cette dernière décennie, les rejets annuels de tritium, radionucléide le plus fréquemment mesuré dans les rejets liquides du CSA, ont varié de 0,2 à 2,1 MBq.

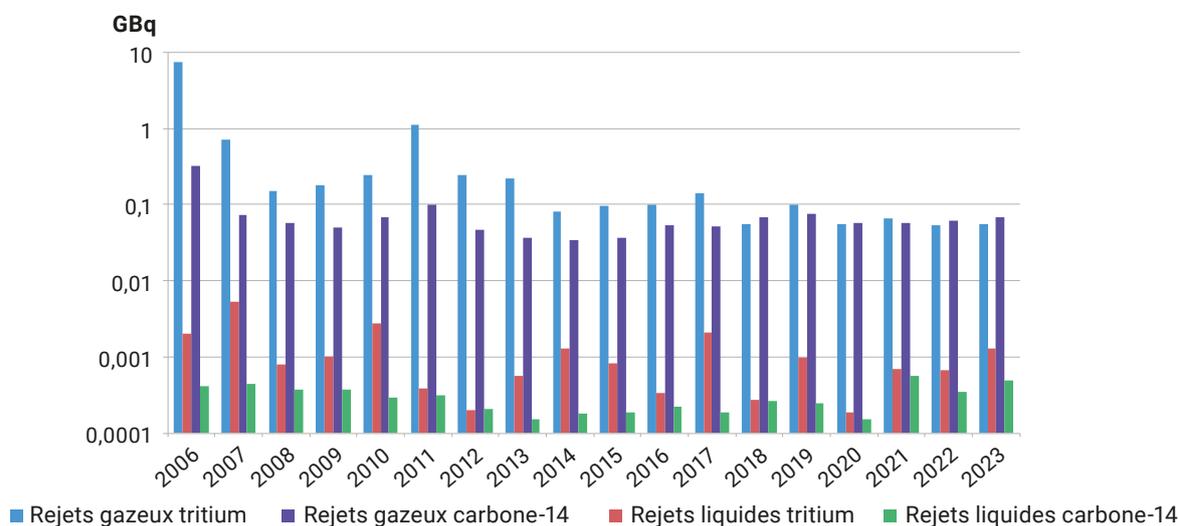
Rejets radioactifs du Cires

Les rejets atmosphériques du Cires sont liés aux activités de traitement des déchets TFA (compactage) et aux activités de tri et de traitement des déchets issus d'activités non électronucléaires. Pour chacun des deux émissaires, 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-125, 129 et 131, du carbone-14 et des mesures des indices d'activités alpha et bêta globaux).

Ces rejets canalisés sont soumis par arrêté préfectoral à des valeurs limites. Au cours de cette dernière décennie, les rejets gazeux annuels de tritium du Cires, varient de 0,040 à 1 GBq.

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 et ne sont donc pas rejetés dans l'environnement. Les autres effluents liquides (eaux pluviales, effluents domestiques...) sont collectés, traités pour certains d'entre eux (décantation, déshuilage), contrôlés, puis dirigés dans le ru Loriguette au nord du site et dans le ru Courgain au sud du site, *via* des bassins.

FIGURE 4 / ÉVOLUTION DES REJETS LIQUIDES ET GAZEUX DE TRITIUM ET DE CARBONE-14 DU CSA DE 2006 À 2023 (GBq/an)



La surveillance radiologique de l'environnement du site

Les plans de surveillance de l'exploitant et de l'IRSN dans l'environnement du CSA et du Cires sont présentés dans le tableau 1.

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

La surveillance du carbone-14 atmosphérique par barboteur, pour laquelle les seuils de décision des méthodes utilisées sont proches du bruit de fond atmosphérique, la surveillance des iodes 125, 129 et 131 sous forme gazeuse par prélèvement d'air sur cartouche ainsi que la surveillance des aérosols atmosphériques n'ont pas permis de quantifier les activités de ces radionucléides dans l'environnement des centres de stockage exploités par l'Andra entre 2021 et 2023. S'agissant du tritium, ce radionucléide n'a pas été détecté sous forme HT ou HTO dans l'air depuis mai 2014. Les seuils de décisions des méthodes analytiques utilisées pour cette surveillance (de l'ordre de 0,1 Bq/m³ d'air) se situant entre 10 et 20 fois au-dessus du bruit de fond du tritium atmosphérique, ces résultats d'analyse ne permettent pas de conclure sur l'influence potentielle des rejets de l'Andra. En revanche, pour ce qui concerne les eaux de pluie collectées entre janvier 2021 et octobre 2023, 236 échantillons ont été analysés et ont montré des activités de tritium inférieures au seuil de décision d'environ 2 Bq/L. Seulement une activité significative est relevée sur la période (de l'ordre de 2,7±2,5 Bq/L), mais celle-ci bien que supérieure au bruit de fond est assortie d'une très forte incertitude, ne permettant pas son

interprétation. Contrairement à la précédente période d'observation (2018-2020), cette absence d'influence des rejets atmosphériques tritiés n'est pas confirmée par les résultats des mesures de ce radionucléide dans les échantillons de végétaux terrestres réalisés sur la période 2021-2023. En effet, parmi les 21 échantillons analysés, 5 d'entre eux (herbes et céréales) présentent des valeurs significatives de tritium organiquement lié. Alors que le bruit de fond pour ce radionucléide est de l'ordre de 0,1 Bq/kg frais (ou 0,8 Bq/L_{ec}), les activités de tritium organiquement lié sont en effet comprises entre 0,89 ± 0,18 Bq/kg frais (ou 5,5 ± 0,9 Bq/L_{ec}) et 1,2 ± 0,65 Bq/kg frais (ou 5,3 ± 2,8 Bq/L_{ec}) en 2022 et de 0,38 ± 0,16 Bq/kg frais (ou 2,9 ± 1,2 Bq/L_{ec}) en 2021. Pour ce qui concerne les céréales, une valeur significative de TOL dans l'orge de 2,8 ± 0,9 Bq/kg frais (ou 5,1 ± 1,5 Bq/L_{ec}) est relevée en 2021 et une autre de 2,9 ± 1,3 Bq/kg frais (ou 6,0 ± 2,7 Bq/L_{ec}) dans le maïs en 2022. Ces activités ne paraissent pas en adéquation avec celles mesurées dans l'eau de pluie et dans l'air ainsi qu'avec les activités de tritium rejetées dans l'atmosphère par les installations de l'Andra (figure 4). Ces rejets sont en effet beaucoup trop faibles pour induire un marquage mesurable dans l'environnement terrestre.

Les activités de carbone-14, entre 2021 et 2023, dans les herbes, les champignons, le lait et les céréales sont comprises entre 217 et 233 Bq/kg de carbone, avec une moyenne à 226 Bq/kg de carbone. Ces résultats sont de l'ordre des activités de carbone-14 dans les zones situées en dehors de toute influence des rejets des sites nucléaires (en moyenne 222 ± 7 Bq/kg de carbone en 2022). Les activités de carbone-14 dans les champignons entre 2021 et 2023 présentent des activités comprises entre 12,3 et 16,4 Bq/kg frais. Dans le lait de vache,

TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DE L'EXPLOITANT ET DE L'IRSN DANS L'ENVIRONNEMENT DU CSA ET DU CIRES

	Exploitant		IRSN
	CSA	Cires	
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> 20 points autour du CSA 1 point de référence hors influence des 2 sites 	<ul style="list-style-type: none"> 13 points autour du Cires et 1 point au sud de celui-ci 	<ul style="list-style-type: none"> Stations Téléray les plus proches : Bar-le-Duc, Bar-sur-Aube, Châlons-en-Champagne, Chaumont, Méry-sur-Seine, Troyes
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement des poussières atmosphériques sur filtre : mesure des indices α et β globaux sur filtre (quotidienne), spectrométrie γ si β global > 2 mBq/m³ 2 points de prélèvement des halogènes sur cartouches : spectrométrie γ (hebdomadaire) 2 points de prélèvement du tritium atmosphérique : HTO-HT (hebdomadaire) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement des poussières atmosphériques sur filtre : mesure des indices α et β globaux sur filtre (hebdomadaire) 1 point de prélèvement des halogènes sur cartouches : spectrométrie γ (mensuelle) 1 point de prélèvement du tritium atmosphérique : HTO-HT (hebdomadaire) 1 point de prélèvement du carbone-14 atmosphérique : CO-CO₂ (hebdomadaire) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement des poussières atmosphériques sur filtres : spectrométrie γ (hebdomadaire)
Eau de pluie	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement : mesure des indices α et β globaux et tritium (hebdomadaire) 		<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement : tritium (mensuelle)
Végétaux terrestres	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement sur le centre 1 point de prélèvement à l'extérieur : spectrométrie γ (mensuelle) et tritium et carbone-14 (annuelles) 		
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement : mesure des indices α et β globaux, spectrométries α et γ (annuelles) 		
Lait	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement : spectrométrie γ (trimestrielle) et tritium et carbone-14 (annuelles) 		
Champignons et principales productions agricoles	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement : mesure des indices α et β globaux, spectrométrie γ, tritium et carbone-14 (annuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement : spectrométrie α et β, tritium et carbone-14 (annuelle) 	
Eau de cours d'eau	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : <ul style="list-style-type: none"> sur eau filtrée : mesure des indices α et β globaux, teneur en potassium, tritium ; sur MES : indice d'activité β global (hebdomadaire), spectrométries α et β (mensuelles). 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en amont du site : <ul style="list-style-type: none"> sur eau filtrée : mesure des indices α et β globaux, teneur en potassium, tritium. sur MES : indice d'activité β global. 1 point de prélèvement dans la Voire en aval du site : <ul style="list-style-type: none"> sur eau filtrée : mesure des indices α et β globaux, teneur en potassium, tritium ; sur MES : indice d'activité β global (mensuel). 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement dans les Noues d'Amance et dans le Ru Courgain en aval des 2 bassins du site : <ul style="list-style-type: none"> sur eau filtrée : mesure des indices α et β globaux, teneur en potassium, tritium ; sur MES : indice d'activité β global (mensuelle). 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en amont du site (commun avec le CSA) : <ul style="list-style-type: none"> sur eau filtrée : mesure des indices d'activité α et β globaux, teneur en potassium, tritium ; sur MES : indice d'activité β global. 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : mesure des indices α et β globaux, spectrométrie γ, teneur en potassium, tritium et strontium-90 (semestrielles)
Sédiments	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : mesure des indices α et β globaux, spectrométries α et γ (mensuelles) 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en amont du site : mesure des indices α et β globaux, spectrométries α et γ (trimestrielles) 1 point de prélèvement dans la Voire en aval du site : mesure des indices α et β globaux, spectrométries α et γ (trimestrielles) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement dans les Noues d'Amance et dans le Ru Courgain en aval des 2 bassins du site : spectrométries α et γ (semestrielles) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : spectrométries α et γ, strontium-90 (semestrielles)
Végétaux aquatiques	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : mesure des indices α et β globaux, spectrométries α et γ (semestrielles) 		<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : spectrométrie γ (semestrielle)
Poisson	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement dans les Noues d'Amance (au point de rejet et en aval du site) : mesure des indices α et β globaux, spectrométries α et γ (annuelles) 		
Eaux de nappe	<ul style="list-style-type: none"> 24 points de prélèvement : <ul style="list-style-type: none"> sur eau filtrée : mesure des indices α et β globaux, potassium, tritium ; sur MES : indice d'activité β global (mensuel à annuel selon le point). 	<ul style="list-style-type: none"> 7 points de prélèvement : <ul style="list-style-type: none"> sur eau filtrée : mesure des indices α et β globaux, potassium, tritium ; sur MES : indice d'activité β global (semestriel). 	

MES : matières en suspension.

la moyenne des activités de carbone-14 est de 19,1 Bq/L. Enfin, les activités massiques de carbone-14 dans les céréales sont de l'ordre de 100 Bq/kg sec. Ces activités témoignent de l'absence de marquage par les rejets de carbone-14 en accord avec les rejets de l'Andra. En comparaison de celles présentées dans les bilans radioécologiques précédents, les activités de carbone-14 dans l'environnement du CSA et du CIRES peuvent paraître en baisse. Cette baisse apparente ne résulte pas d'une diminution des rejets, mais de la mise en œuvre de l'Andra depuis 2019 d'une métrologie plus performante pour estimer l'activité de carbone-14 adaptée aux niveaux environnementaux

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

Pour ce qui concerne la surveillance des cours d'eau, le tritium n'a pas été détecté depuis août 2014 dans les mesures réalisées dans les eaux des ruisseaux situés en amont du Cires (ruisseau de Chantecoq), entre le Cires et le CSA (ru Courgain, ru Loriguette) et en aval du CSA (Noues d'Amance, notamment).

Pour ce qui concerne les sédiments et les poissons, les analyses réalisées ne mettent pas en évidence un marquage du compartiment aquatique par les rejets des centres exploités par l'Andra. Les activités de carbone-14 dans les poissons sont comprises entre 223 et 236 Bq/kg de carbone.

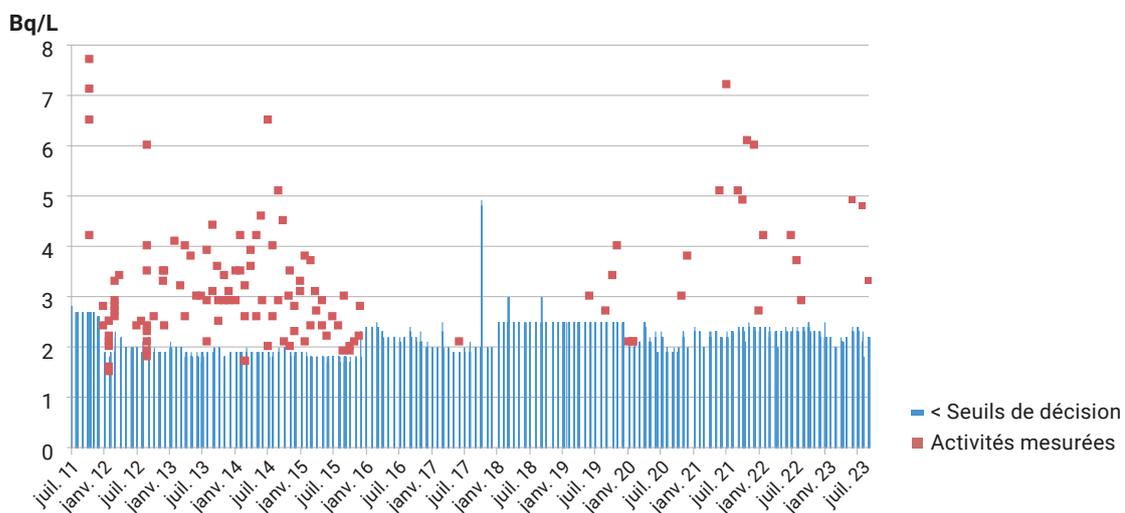
La surveillance radiologique des eaux souterraines de ces deux centres est réalisée à partir des piézomètres installés à l'intérieur et à l'extérieur des sites. En comparaison de la période 2018-2020 (huit détections),

le tritium a été détecté un peu plus souvent dans les eaux souterraines. En effet, à partir de janvier 2021 (figure 5), le tritium a été détecté quatorze fois avec une activité maximale de $7,2 \pm 2,8$ Bq/L, nettement supérieure au bruit de fond dans un piézomètre situé à proximité des ouvrages de stockage. Il est à noter qu'aucune valeur significative n'a été détectée dans les piézomètres situés en dehors du périmètre des centres de stockage entre 2021 et 2023. Les mesures en émetteurs alpha et émetteurs bêta n'ont pas mis en évidence de marquage par les rejets des centres de l'Andra.

S'agissant de la mesure du rayonnement ambiant, les débits de doses moyens estimés en clôture du CSA sont compris entre 90 nSv/h (dosimètre D11) et 118 nSv/h (dosimètre D24). La moyenne des débits de doses estimés entre 2021 et 2023 autour du CSA et de 105,6 nSv/h. Le débit de doses moyen estimé au point de référence hors influence (D13 situé dans la commune de La Chaise), sur cette même période, est de 79 nSv/h. Pour un promeneur adulte passant une dizaine d'heures à proximité du CSA, la dose externe induite est estimée à 0,26 μSv .

Il est à noter que la CLI de Soulaines a commandé une étude environnementale à l'ACRO dont la stratégie d'échantillonnage inclut des prélèvements dans les eaux souterraines, les eaux de surface, les sédiments, les sols, les végétaux terrestres, les légumes, du gibier, des poissons ainsi que de la vigne ainsi que des mesures du débit de doses à la clôture des sites. Les résultats de cette étude qui s'est déroulée en 2023, disponibles au deuxième trimestre 2024, n'ont pu être intégrés à ce bilan des données environnementales des centres de stockages de l'Aube, elles le seront dans le prochain bilan radiologique triennal.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM DANS LES EAUX SOUTERRAINES PRÉLEVÉES DANS LES PIÉZOMÈTRES DES CENTRES CSA ET CIRES ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2023 (tous piézomètres confondus) (Bq/L)



2.4. LES SITES DE RECHERCHE

Le site de Bruyères-le-Châtel

Le site CEA de Bruyères-le-Châtel, rattaché au centre CEA DAM Île-de-France, est implanté sur les communes de Bruyères-le-Châtel et d'Ollainville dans le sud de l'Essonne, sur le bassin-versant de l'Orge, un des affluents situés en rive droite de la Seine, à l'amont de Paris (figures 1 et 2). Le site comprend une INBS en démantèlement depuis 1997.

Les activités de cet établissement de recherche concernent la conception et la garantie du fonctionnement et de la sûreté des armes nucléaires françaises, en s'appuyant sur la simulation. Elles concernent également la lutte contre la prolifération et le terrorisme avec notamment une mission de contrôle des traités internationaux, ainsi que la conception et le maintien en conditions opérationnelles des chaufferies nucléaires embarquées et de leurs cœurs nucléaires.

Les rejets radioactifs

S'agissant de l'INBS de Bruyères-le-Châtel, réglementée par l'arrêté d'autorisation de rejets et prélèvements d'eau du 23 décembre 2013, les opérations d'assainissement et de démantèlement du site se poursuivent depuis 1997. Elles génèrent des rejets gazeux de tritium, seul radionucléide autorisé à être rejeté dans l'atmosphère pour ce site. Les activités rejetées sont en constante réduction depuis 2003 et en particulier depuis 2011 dans l'atmosphère (figure 3). Les rejets gazeux font l'objet de contrôles à l'aide de barboteurs installés sur les deux émissaires CH1 et CH2.

Le tritium est également présent dans les rejets liquides du site issus des effluents liquides industriels et des eaux pluviales. Les rejets liquides de tritium ont chuté d'un facteur 7 depuis 2007. Depuis, ils se maintiennent à un niveau inférieur à 0,5 GBq/an (figure 4). Les effluents industriels traités et les eaux pluviales se retrouvent dans le ru du Grand Rué puis dans le ruisseau de la Rémarde qui constitue le milieu récepteur des rejets liquides de l'INBS.

FIGURE 1 / LOCALISATION DU SITE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL ET DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT DU CEA

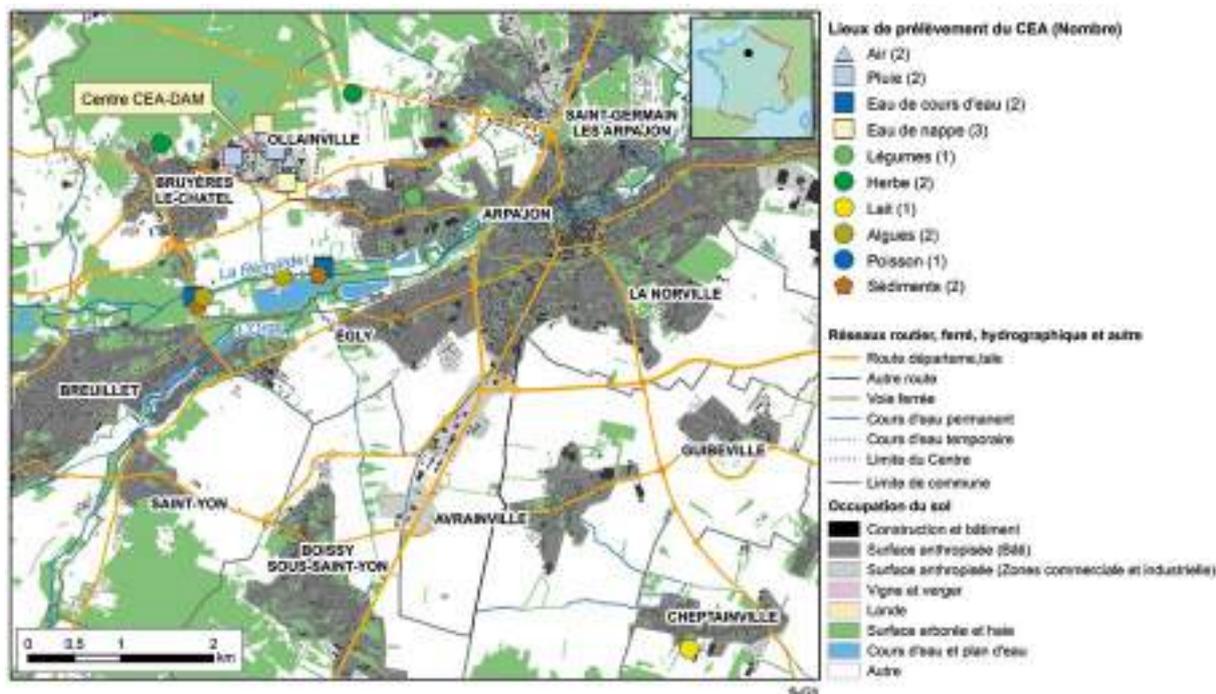
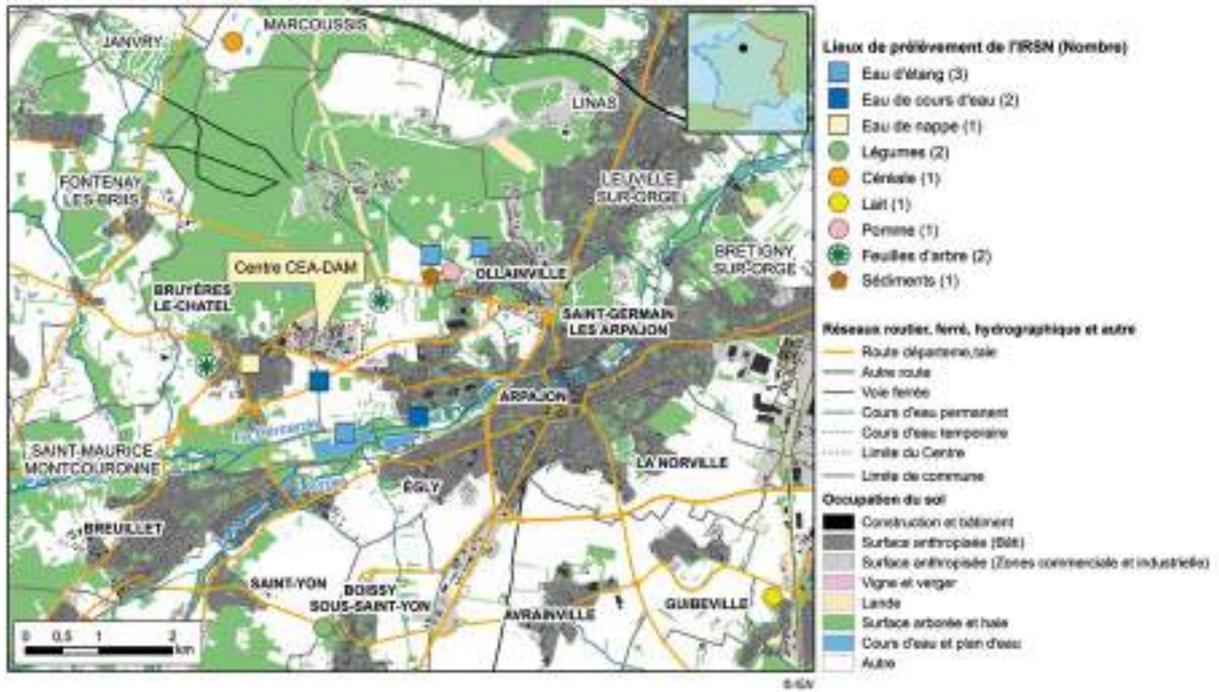


FIGURE 2 / LOCALISATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE L'IRSN



Prélèvement d'eau de surface dans les environs du site de Bruyères-le-Châtel

© CEA

FIGURE 3 / ÉVOLUTION DES REJETS GAZEUX DE TRITIUM DU SITE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL (TBq/an)

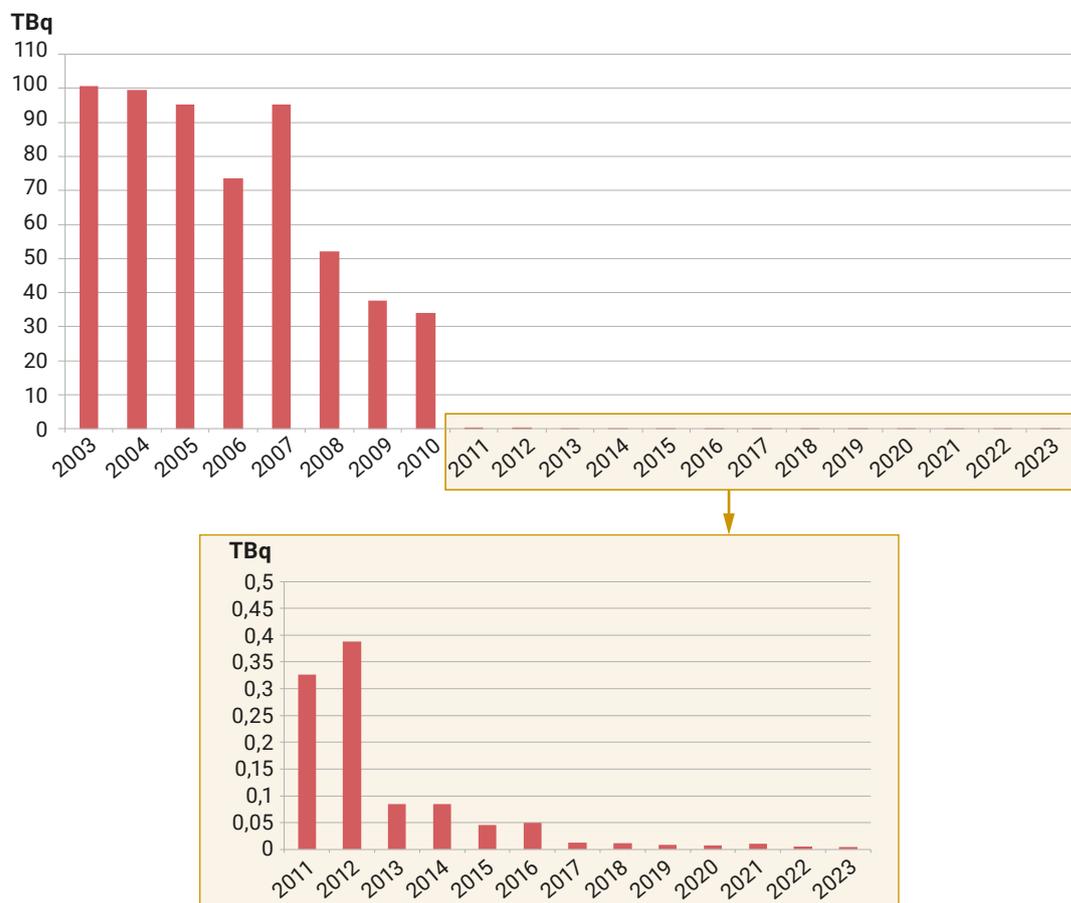
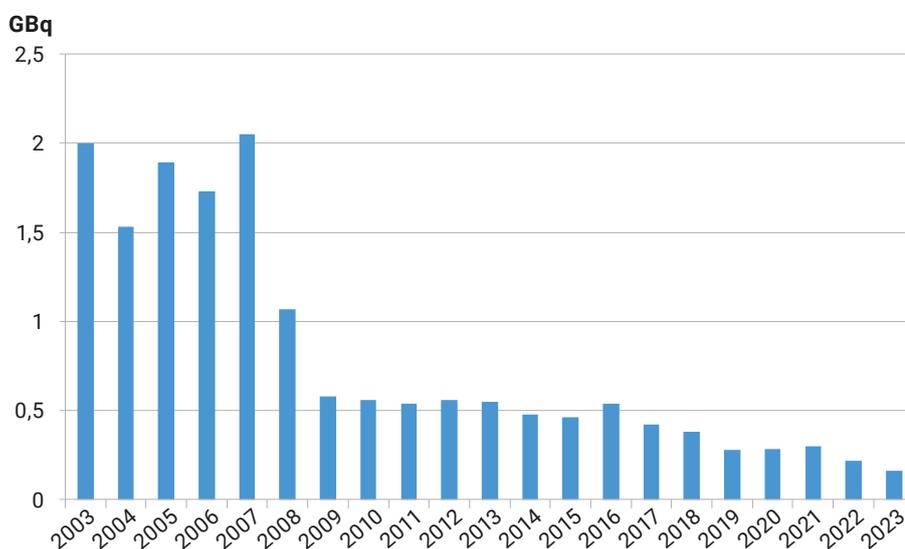


FIGURE 4 / ÉVOLUTION DES REJETS LIQUIDES DE TRITIUM DU SITE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL (GBq/an)



La surveillance radiologique de l'environnement du site

La surveillance de l'environnement est réalisée par le CEA et l'IRSN (tableau 1 et figures 1 et 2) dans les compartiments atmosphérique (précipitations et gaz), terrestre (végétaux et denrées) et aquatique (sédiments, flore et faune, eaux de cours d'eau et de nappe).

Une étude complémentaire a été menée par l'IRSN en 2021 avec pour objectif de fournir une information plus exhaustive de l'état actuel des niveaux de radioactivité de l'environnement du site et d'évaluer l'opportunité d'optimiser le plan de surveillance à la suite de la réduction des activités et des rejets (cf. focus, p. 179).

Jusqu'en octobre 2013, les mesures de tritium dans l'air portaient sur le tritium total, puis à partir de novembre 2013, les différentes formes (tritium de la vapeur d'eau et tritium gazeux) ont été analysées séparément. L'influence des rejets gazeux de tritium était visible sporadiquement dans l'atmosphère, en gaz tritié (HT) et vapeur d'eau tritiée (HTO). Les quelques déterminations concomitantes de tritium sous formes HT et HTO obtenues par le passé montraient des contributions similaires de ces deux formes.

TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DU CEA ET DE L'IRSN

CEA			
Type de prélèvement ou de mesure	Fréquence annuelle	Nombre de points de prélèvement	Analyse
Air	24	2	Tritium
Débit de dose gamma ambiant	Continue	4	Débit de dose
Eau de cours d'eau	52	2	Mesure des indices d'activités alpha et bêta globaux, tritium
Eau de nappe	2	3	Tritium
Eau de pluie	24	2	Tritium
Faune aquatique	1	1	Gamma, Tritium libre et total
Lait	1	1	Tritium libre
Principales productions agricoles	1	1	Tritium libre et total
Sédiments dulçaquicoles	1	2	Gamma, Tritium libre et total
Végétaux aquatiques	1	2	Gamma, Tritium libre et total
Végétaux terrestres	4	2	Tritium libre

IRSN			
Type de prélèvement	Fréquence annuelle	Nombre de points de prélèvement	Analyse
Céréales	1	1	Gamma
Feuilles d'arbres	1	2	Gamma, tritium libre et organiquement lié
Légumes feuilles	1	1	Gamma, tritium libre et organiquement lié
Sédiments	1	1	Gamma U Pu Am
Eau douce	2	5	Tritium libre
Eau de nappe	1	2	Tritium libre
Fruit	1	1	Gamma
Lait	1	1	Gamma, tritium libre

Influence du site sur son environnement

Les concentrations de tritium dans l'air autour du site sont en diminution depuis 2009 en lien avec la diminution des rejets atmosphériques de ce radionucléide. Les résultats de mesure acquis depuis 2015 sont tous inférieurs aux seuils de décision fixés à 0,5 Bq/m³ conformément aux prescriptions réglementaires. Ces résultats ne permettent pas de déceler l'influence potentielle des rejets tritiés du site sur les activités volumiques de tritium dans l'air.

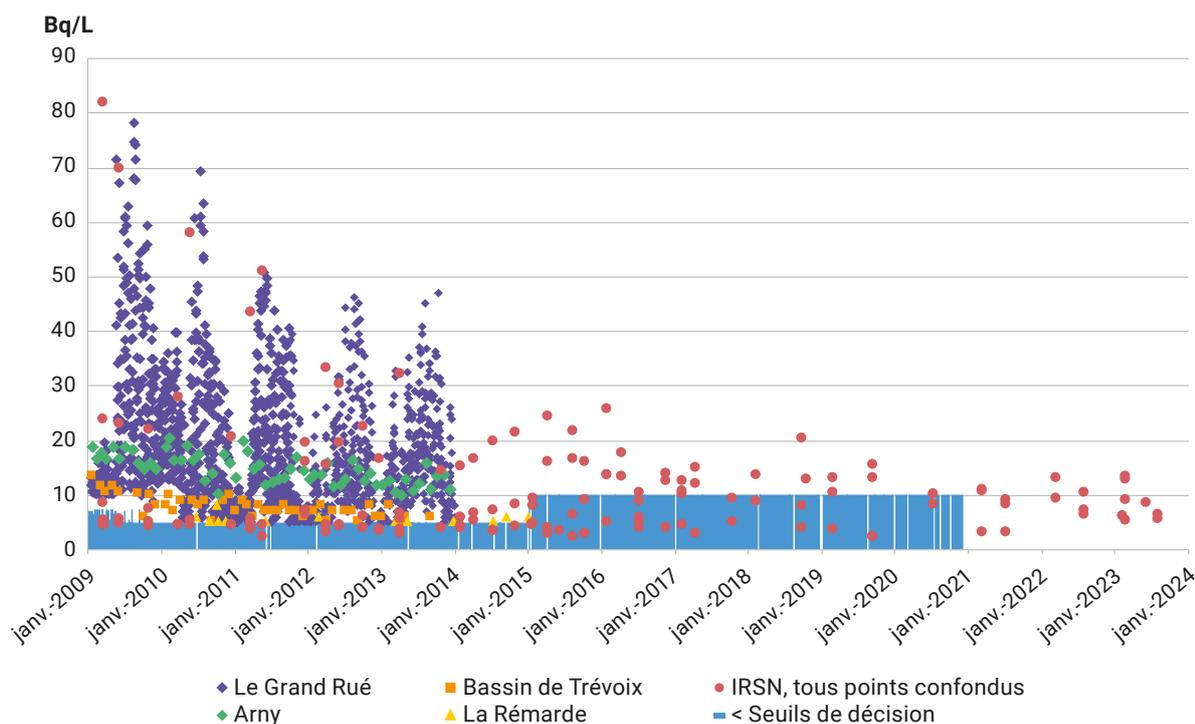
Les mesures de tritium effectuées par le CEA dans l'eau de pluie sur la période 2021-2023 n'ont révélé aucun résultat supérieur au seuil de décision de 10 Bq/L requis réglementairement.

La surveillance des eaux de surface (cours d'eau, étang, bassin) est réalisée par le CEA et l'IRSN. Les prélèvements journaliers dans les eaux du ru du Grand Rué ont pris fin en décembre 2013. Jusqu'à cette date, l'évolution des activités de tritium dans ce cours d'eau montrait un cycle avec des valeurs plus élevées en été et des valeurs plus faibles durant l'hiver (figure 5). Cette évolution avait pour origine les variations importantes du débit du ruisseau du Grand Rué et donc la diminution

du potentiel de dilution en lien avec le débit très faible au cours de l'été. Là encore, la réduction des rejets notamment par voie liquide permet d'expliquer la tendance générale. Les prélèvements dans la Rémarde, dans laquelle se déversent les eaux du ru du Grand Rué, ont été maintenus sur une base hebdomadaire. Sur la période 2021-2023, les mesures effectuées par le CEA montrent des activités volumiques de tritium inférieures au seuil de décision de 10 Bq/L fixé réglementairement tandis que les analyses réalisées par l'IRSN, dont le seuil de décision est de l'ordre de 2 Bq/L, permettent de mesurer le tritium dans 54 % des échantillons avec une activité systématiquement supérieure au bruit de fond actuel (environ 0,8 Bq/L). Lorsqu'il est mesuré, son activité est comprise entre 3,2 et 12,9 Bq/L avec une moyenne qui s'établit à 8,6 Bq/L. On note également que les activités entre 2021 et 2023 sont inférieures à celles mesurées au cours de la précédente période (figure 5).

Les eaux souterraines du site font également l'objet de prélèvements semestriels et de mesures de tritium en amont (1 point) et en aval hydrogéologique du site (2 points), depuis 2016. Si les activités restent inférieures au seuil de décision (10 Bq/L) dans les

FIGURE 5 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM DANS LES EAUX DE SURFACE PRÉLEVÉES À PROXIMITÉ DU SITE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL ENTRE JANVIER 2009 ET DÉCEMBRE 2023 (Bq/L)



eaux de nappe hors influence du site, les activités au niveau du site témoignent de son influence, avec des activités comprises entre 37 Bq/L et 110 Bq/L depuis 2016 et une moyenne sur la période 2021-2023 de 89,5 Bq/L dans les eaux du piézomètre situé à l'aval proche du site et 57,3 Bq/L pour le piézomètre situé à l'aval plus lointain. Les mesures réalisées par l'IRSN sur la commune de Bruyères-le-Châtel indiquent également la présence de tritium au-dessus du bruit de fond radiologique, avec une activité moyenne de l'ordre de 7,6 Bq/L entre 2021 et 2023.

Les résultats dans les prélèvements trimestriels d'herbe effectués par le CEA restent inférieurs aux seuils de décision depuis 2017. Les mesures réalisées de tritium organiquement lié dans les salades prélevées par l'IRSN varient de 0,04 à 0,1 Bq/kg frais, de l'ordre du bruit de fond du tritium entre 2021 et 2023. Les feuilles d'arbres prélevées par l'IRSN à Bruyères-le-Châtel entre 2021 et 2023 présentent également des activités de tritium organiquement lié (de 1,22 à 1,46 Bq/kg sec pour une activité moyenne de 1,4 Bq/kg sec) comprises dans la gamme du bruit de fond ; en revanche, les feuilles d'arbres prélevées à Ollainville, sous les vents dominants, révèlent un marquage en tritium avec des activités de tritium organiquement lié qui évoluent entre 3,9 et 9,5 Bq/kg sec pour une moyenne de 7,6 Bq/kg sec entre 2021 et 2023.

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

Évaluation dosimétrique

En dehors des analyses effectuées sur les feuilles d'arbres, la surveillance radiologique de l'environnement du site CEA de Bruyères-le-Châtel montre que l'influence des rejets du site reste discrète dans l'environnement terrestre. La baisse continue des rejets, associée à une rémanence de moins en moins prononcée de tritium dans l'environnement ne permet plus, compte tenu des seuils de décisions fixés réglementairement, de quantifier l'activité ajoutée de tritium par les rejets du site dans l'air et les denrées de l'environnement proche pour procéder à une évaluation dosimétrique.

FOCUS
ÉTUDE COMPLÉMENTAIRE DE L'IRSN
DANS L'ENVIRONNEMENT DU CEA
DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL DE 2021

En complément des programmes de surveillance de l'environnement réalisés par le CEA et l'IRSN, une étude a été menée par l'IRSN en 2021. Cette étude avait pour objectif de fournir une information plus exhaustive de l'état actuel des niveaux de radioactivité dans l'environnement du site afin d'évaluer l'opportunité d'optimiser le

plan de surveillance de l'IRSN, redéployé en 2019, à la suite de la réduction des activités du site contribuant à une diminution des rejets.

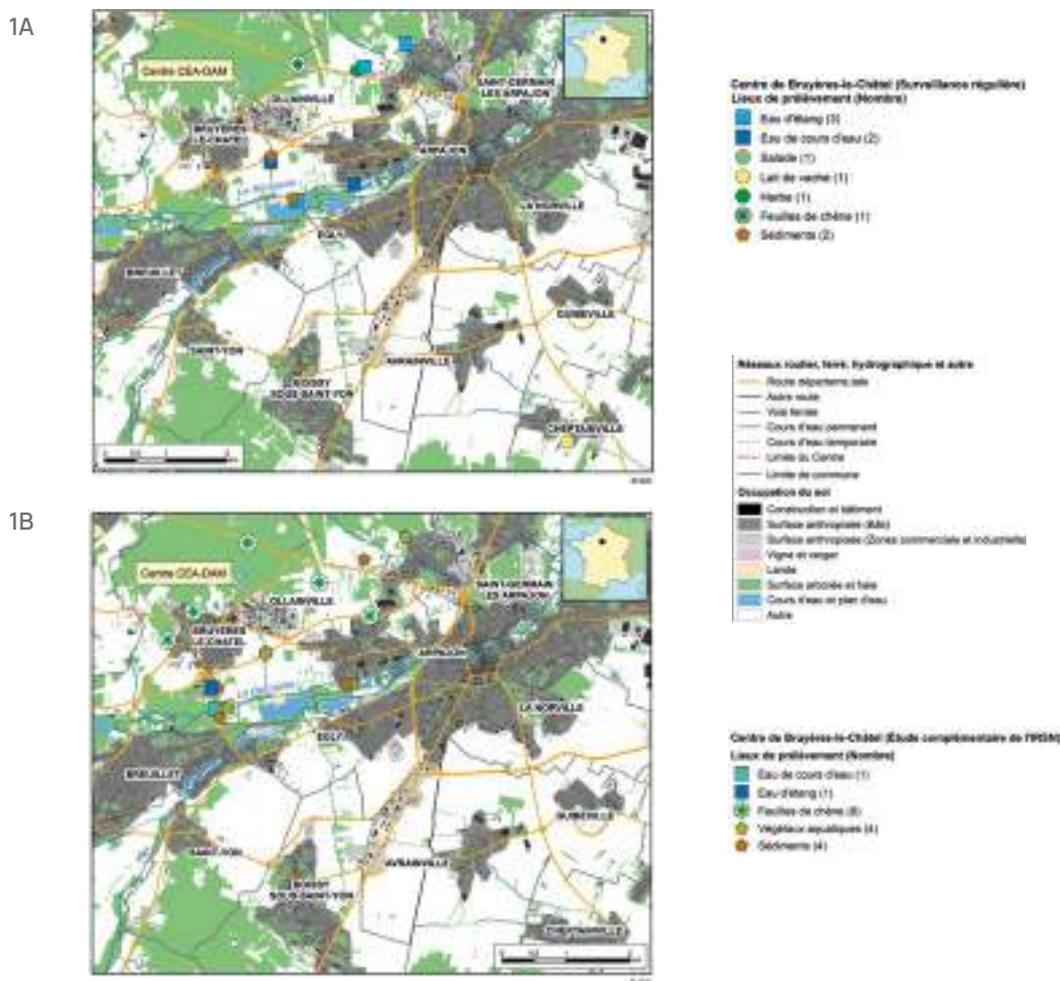
Stratégie d'échantillonnage et de mesures

Des prélèvements de feuilles de chênes, d'eau de surface, de sédiments et de végétaux aquatiques ont ainsi été ajoutés à la surveillance régulière de l'IRSN, associés à un plus large spectre d'analyse (tableau 1, figure 1).

TABLEAU 1 / PRÉLÈVEMENTS COMPLÉMENTAIRES RÉALISÉS PAR L'IRSN EN 2021

Matrices	Nombre	Analyses
Sédiments	4	Gamma U Pu Am
Feuilles d'arbres	4	TOL + HTO
Eaux de cours d'eau	2	HTO
Plantes aquatiques	4	Gamma U Pu Am TOL

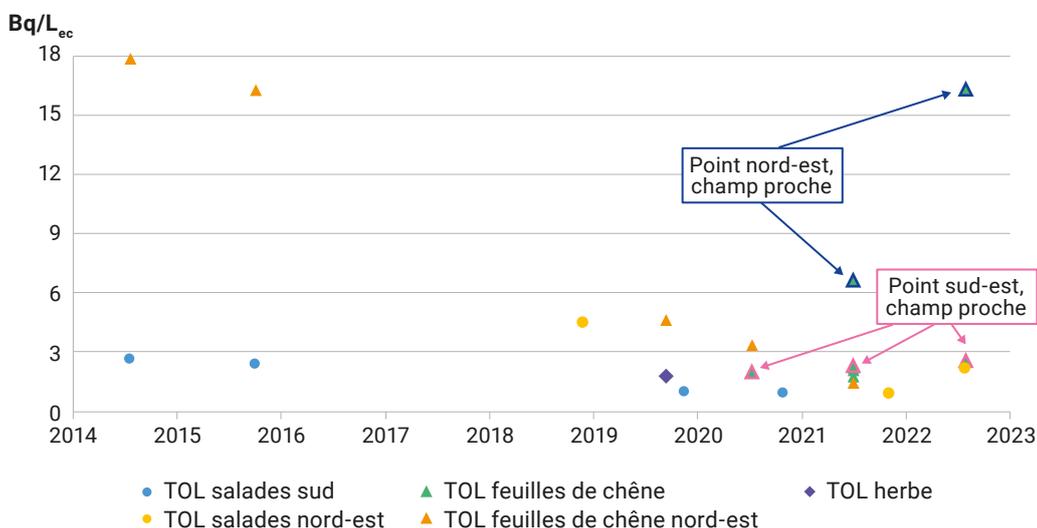
FIGURE 1 / SURVEILLANCE RÉGULIÈRE IRSN EN 2019 (1A) ET 2021 (1B)



État radiologique de l'environnement terrestre

La représentation des activités de TOL dans les feuilles de chênes prélevées au nord-est du site entre 2014 et 2021 (figure 2) met en évidence une diminution cohérente avec la baisse des rejets atmosphériques de tritium du CEA survenue en 2012 puis en 2016 (chapitre 2.4, site de Bruyères-le-Châtel). En effet, les activités de tritium organiquement lié, qui reflètent l'activité moyenne de tritium dans l'air durant la croissance des feuilles, ont diminué d'un facteur 6, passant de 18 à 3 Bq/L d'eau de combustion sur cette période, activités néanmoins toujours supérieures aux valeurs de référence hors influence d'une installation nucléaire (0,8 Bq/L_{ec}).

FIGURE 2 / ACTIVITÉS DE TOL DANS LES VÉGÉTAUX TERRESTRES AUTOUR DU SITE DEPUIS 2014 (Bq/L d'eau de combustion)



Les prélèvements complémentaires réalisés en 2021 permettent de confirmer cette tendance, à l'exception d'un point situé en champ proche et dans l'axe préférentiel des vents dominants (vents dominants venants du sud-ouest et secondaires, venants du nord-est), pour lequel l'activité en TOL atteint 6,6 Bq/L_{ec} soit trois fois le niveau observé sur les autres points. La représentation spatiale des activités (figure 3) permet par ailleurs d'observer la cohérence de la répartition des activités avec la rose des vents.

Deux points prospectés lors de l'étude au nord-est et sud-ouest ont été pérennisés dans le plan de surveillance du site et les résultats obtenus pour 2022 confirment leur intérêt avec des activités respectives de tritium organiquement lié de 16,3 et 2,5 Bq/L d'eau de combustion.

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DE TOL DANS LES FEUILLES DE CHÊNES AUTOUR DU SITE EN 2021
 (Bq/L d'eau de combustion)



Les résultats de tritium libre, qui témoignent de l'activité du tritium dans l'air dans les heures qui ont précédé les prélèvements, ne sont significatifs que dans les feuilles de chêne pour lesquelles la valeur en de TOL est la plus élevée, sur les points situés au nord-est du site. Les résultats obtenus dans les autres prélèvements sont proches des valeurs de référence hors influence d'une installation nucléaire.

Les activités de tritium libre ($1,6 \pm 1,5$ Bq/L) et de tritium organiquement lié ($1,7 \pm 0,7$ Bq/L d'eau de combustion) dans l'herbe prélevée au nord-est du site en 2019 se situent dans la gamme des valeurs de référence hors influence pour le tritium libre (entre 0,4 et 2 Bq/L).

Cette matrice dont le prélèvement est compromis par les sécheresses estivales a été abandonnée et remplacée par un prélèvement de feuilles de chêne dans la même zone.

De 2014 à 2020 les prélèvements de salades fournis à l'IRSN ont été réalisés chez un producteur situé à 4 km au sud du site, à l'exception de l'année 2018 où ils ont été effectués en champ proche (un peu moins de 2 km), année pour laquelle l'activité de tritium organiquement lié est deux fois plus importante. Lors de la campagne de 2021 et en 2022, les échantillons de salades ont donc été prélevés par l'IRSN, chez le même producteur qu'en 2018. Les activités de tritium organiquement lié sont de $0,86$ Bq/L_{ec} en 2021 et de $2,14$ Bq/L_{ec} en 2022. Cette exploitation, située proche du site et sous les vents dominants venant du sud-ouest, est désormais pérennisée dans le plan de surveillance pour suivre l'influence du site sur cette denrée alimentaire.

L'étude du compartiment terrestre réalisée en 2021 confirme une influence faible du site, limitée au champ proche dans le couloir des vents dominants et secondaires. Cette étude a permis de faire évoluer le plan de surveillance de l'environnement terrestre du site en prenant en compte dorénavant de nouveaux points de prélèvement de feuilles de chêne et de salades.

État radiologique de l'environnement aquatique

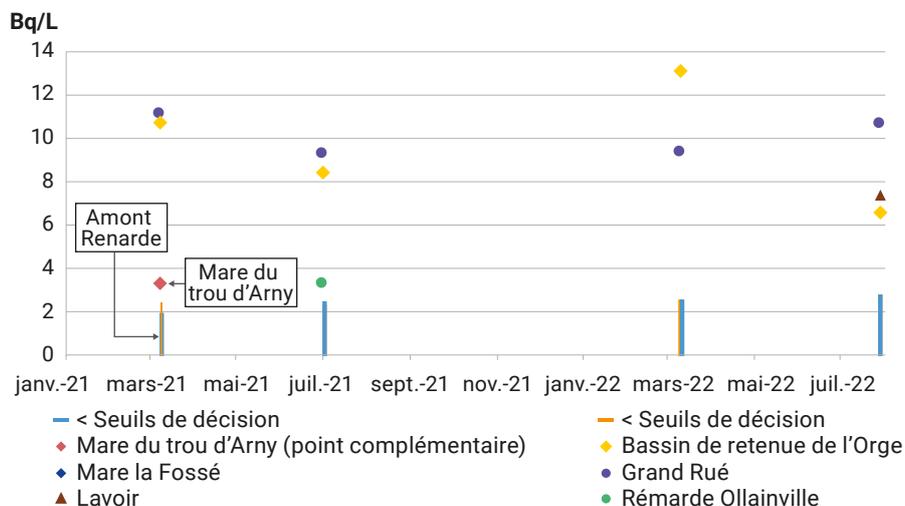
Les résultats obtenus dans les prélèvements d'eau douce réalisés autour du site témoignent de la diminution des rejets liquides du site. Les activités de tritium dans les eaux de la Rémarde à Ollainville ont effectivement diminué d'un facteur 100 au cours des cinquante dernières années, avec des variations annuelles plus ou moins importantes, imputables au caractère instantané du prélèvement d'eau (chapitre 2.4, site de Bruyères-le-Châtel).

En 2021, en complément des prélèvements de la surveillance régulière, un point en amont de la confluence avec le Grand Rué (exutoire des rejets du site) a été ajouté sur la Rémarde ainsi qu'un point dans la mare du trou d'Arny située au sud-sud-est du site. Des prélèvements de végétaux aquatiques et des analyses de TOL ont également été réalisés ainsi que des mesures gamma sur plusieurs prélèvements de sédiments afin de suivre l'évolution des marquages historiques.

Eaux de cours d'eau, d'étang, de mare et de résurgence

Depuis 2018, une stabilisation des niveaux de tritium est observée dans l'ensemble des prélèvements d'eau réalisés autour du site, qu'il s'agisse d'eaux de surface ou d'eaux souterraines (figure 5).

FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS LES EAUX AUTOUR DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL



L'influence des rejets liquides du site sur le ruisseau du Grand Rué reste visible avec des activités de tritium comprises entre 10 et 16 Bq/L, de même que l'influence des rejets atmosphériques sur les eaux de Mare Fontaine, située sous les vents dominants (activités de tritium comprises entre 8 et 13 Bq/L sur la période). Dans la mare du trou d'Arny, située sous les vents secondaires du site, l'activité est significative de l'ordre de 3 Bq/L. Cette influence n'est plus visible dans les eaux de Mare la Fossé, plus éloignée du CEA (résultats en tritium systématiquement en dessous du SD), confirmant l'influence très localisée du site et le peu d'intérêt de ce point désormais.

Les prélèvements d'eau dans la Rémarde présentent des activités rarement significatives mais assurent un point prélèvement lorsque le Grand Rué est asséché.

Les derniers prélèvements d'eau du lavoir, seul point de résurgence de la nappe, présentaient une activité significative inférieure à 10 Bq/L ($7,3 \pm 2,9$ Bq/L), témoignant de la diminution du marquage de la nappe.

Sédiments

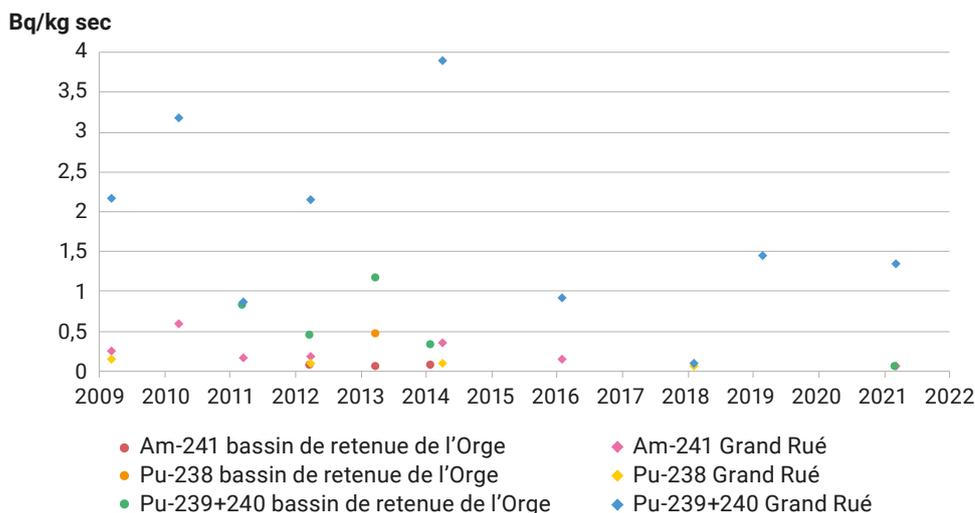
Les activités de ^{137}Cs obtenues dans les prélèvements de sédiments complémentaires (0,24 à 1,87 Bq/kg sec) sont comprises dans la gamme des activités moyennes hors influence des installations nucléaires observées dans les fleuves français (1,9 à 13,4 Bq/kg sec) dont l'origine est imputée aux retombées des essais des tirs atmosphériques et à l'accident de Tchernobyl.

Les résultats des activités en uranium obtenus dans ces mêmes échantillons varient de 6,90 à 20,3 Bq/kg sec et se situent en dessous des moyennes de celles mesurées dans les fleuves français (environ 22 Bq/kg sec). Dans les mares et le bassin de retenue de l'Orge, les valeurs sont également de l'ordre de la vingtaine de Bq/kg sec, à l'exception de la mare du trou d'Arny présentant des activités jusqu'à 5 fois supérieures à celles citées précédemment (99 Bq/kg sec), déjà observées en 2008 (les rapports massiques $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ proches de 0,71 % sont conformes à l'attendu de 0,719 % pour le minerai naturel).

Les activités de plutonium et d'américium dans les sédiments témoignent également d'une diminution des activités dans le temps (figure 5). Seuls les niveaux mesurés dans le Grand Rué sont supérieurs aux niveaux de référence mesurés dans les fleuves français (aux alentours de 0,1 Bq/kg sec pour le plutonium-239+240, imputables aux retombées des essais nucléaires atmosphériques).

Ces résultats montrent que l'influence des activités passées du centre est encore visible dans les sédiments du Grand Rué, proche du site et s'atténue rapidement lorsque l'on s'éloigne, notamment dans la retenue de l'Orge, point de prélèvement ne présentant plus d'intérêt pour la surveillance annuelle.

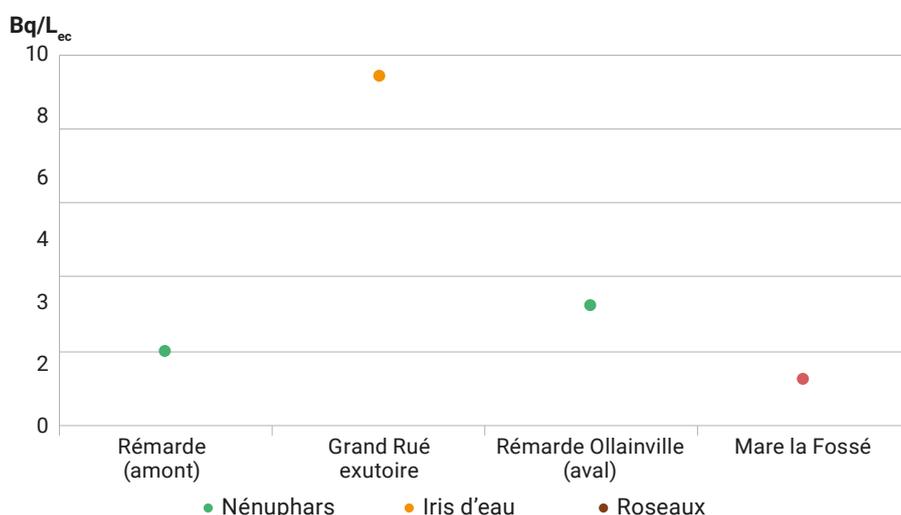
FIGURE 5 / ACTIVITÉS DE PLUTONIUM ET D'AMÉRICIUM DANS LES SÉDIMENTS



Végétaux aquatiques

Dans les végétaux aquatiques, prélevés exclusivement dans le cadre de cette campagne afin de bénéficier de niveaux dans cette matrice, les activités de TOL sont cohérentes avec les activités de tritium dans l'eau, et proches des valeurs de référence hors influence. À l'exception des iris d'eau prélevés dans le Grand Rué, ruisseau récepteur des effluents liquides du site, qui présentent une activité plus élevée de $9,44 \pm 1,05$ Bq/L d'eau de combustion mais cohérente avec l'activité de tritium dans l'eau du ruisseau de 9,3 Bq/L (figure 6).

FIGURE 6 / ACTIVITÉS DE TOL DANS LES VÉGÉTAUX AQUATIQUES PRÉLEVÉS À PROXIMITÉ DU SITE EN 2021 (Bq/L d'eau de combustion)



Une activité de césium-137 de $0,62 \pm 0,27$ Bq/kg sec a été mesurée dans les roseaux prélevés au niveau de Mare la Fosse. Cette activité est comprise dans la gamme des activités mesurées dans les végétaux aquatiques des fleuves français en dehors de l'influence d'une installation nucléaire.

Dans le compartiment aquatique comme pour le terrestre, l'influence du site passée et présente est toujours visible en aval proche du site au niveau du ruisseau du Grand Rué et s'estompe rapidement lorsque l'on s'éloigne du site.

En conclusion

Compte tenu des résultats, il apparaît que la surveillance telle qu'elle est réalisée par l'IRSN permet d'assurer un suivi pertinent du marquage actuel et passé de l'environnement du site de Bruyères-le-Châtel. Les points de prélèvement et les analyses complémentaires réalisés dans les compartiments aquatique et terrestre lors de la campagne ont permis de confirmer un juste déploiement géographique en cohérence avec l'influence des rejets du site. Cette étude a néanmoins permis d'optimiser cette surveillance en apportant quelques ajustements en lien avec l'évolution des activités du site (diminution des rejets liquides et atmosphériques) et/ou de la disponibilité des matrices.

Le site de Cadarache

Le centre CEA de Cadarache (figure 1) a été créé par décret du 14 octobre 1959. Il est implanté sur la commune de Saint-Paul-Lez-Durance dans les Bouches-du-Rhône, à la jonction de trois autres départements (Alpes-de-Haute-Provence, Var et Vaucluse). Ce centre 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 centre de Cadarache regroupe :

- 21 installations nucléaires de base (INB) ;
- 22 installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) hors INB, dont 15 à « caractère nucléaire », ainsi qu'une activité relevant d'un classement ICPE à l'échelle de l'établissement pour le cumul des installations de combustion du centre ;
- 22 installations mettant en œuvre des substances radioactives relevant d'une autorisation au titre du code de la santé publique, parmi lesquelles plusieurs relèvent d'un classement ICPE.

Le CEA exploite également sur le site de Cadarache une installation nucléaire de base secrète dédiée à la propulsion nucléaire (INBS-PN) dont l'exploitant est le centre DAM Île-de-France. Le réacteur d'essais (RES) a divergé le 10 octobre 2018.

Les rejets radioactifs

Outre les gaz rares (krypton...) rejetés par certaines INB du centre (INB 24-Cabri, INB 55-Leca-Star, INB 92-Phébus...), le principal radionucléide rejeté par voie atmosphérique par les installations nucléaires de Cadarache est le tritium, atteignant selon les années, de 50 à 170 GBq/an (tableau 1 et figure 2) pour les rejets canalisés. En comparaison du tritium, l'activité de carbone-14 rejetée dans l'atmosphère est, selon les années environ 10 à 100 fois plus faible. Des émissions diffuses de radon et de tritium, liées à la nature de certains colis de déchets entreposés sur des INB, sont également rejetées.

Après des contrôles radiologiques au niveau de chaque installation, les effluents radioactifs liquides du centre sont transférés vers la station de traitement des effluents actifs du centre (INB 171-Agate) ou vers un autre exutoire hors du centre. L'installation Agate 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 conditions de transfert sont transférés à la station d'épuration des effluents industriels (STEP EI) du centre par le réseau de collecte spécifique des effluents industriels. Après traitement, ces effluents sont ensuite rejetés dans la Durance (tableau 2 et figure 2). Le tritium est le principal radionucléide rejeté par voie liquide.

La présence de traces de radionucléides artificiels dans les réseaux d'eaux pluviales de l'INB 37B (en juillet 2022), de l'INB 52-ATUE (en octobre 2022), et de l'INB 56 (en novembre 2022), respectivement, ainsi que des dépassements du seuil de décision sur les contrôles de rejets tritiés de l'INB 156 (CHICADE) (survenus en 2020 et 2021) ont fait l'objet de déclarations d'incidents à l'ASN. Ces événements n'ont pas eu de conséquences significatives, ni sur les personnels, ni sur l'environnement.

L'INBSPN dispose quant à elle d'une autorisation de rejet de 45 GBq/an pour le tritium et 17 GBq/an pour le carbone-14.

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, alpha/bêta) ou en différé (poussières atmosphériques, tritium, carbone-14, halogènes, 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 compartiment terrestre, des prélèvements trimestriels 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 de sol est également réalisée. Les prélèvements terrestres font généralement l'objet d'une spectrométrie gamma et alpha. Ces analyses sont complétées par la mesure du tritium, du carbone-14 et du strontium-90 (tableau 3).

En complément, des prélèvements réalisés dans le compartiment terrestre, quinze dosimètres disposés principalement en clôture du site, mesurent le débit d'équivalent de dose dans l'air ambiant.

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) de l'exutoire du centre de Cadarache. Des prélèvements sont également effectués au niveau de l'émissaire de la canalisation des rejets et au

FIGURE 1 / LE SITE DE CADARACHE



© CEA Cadarache

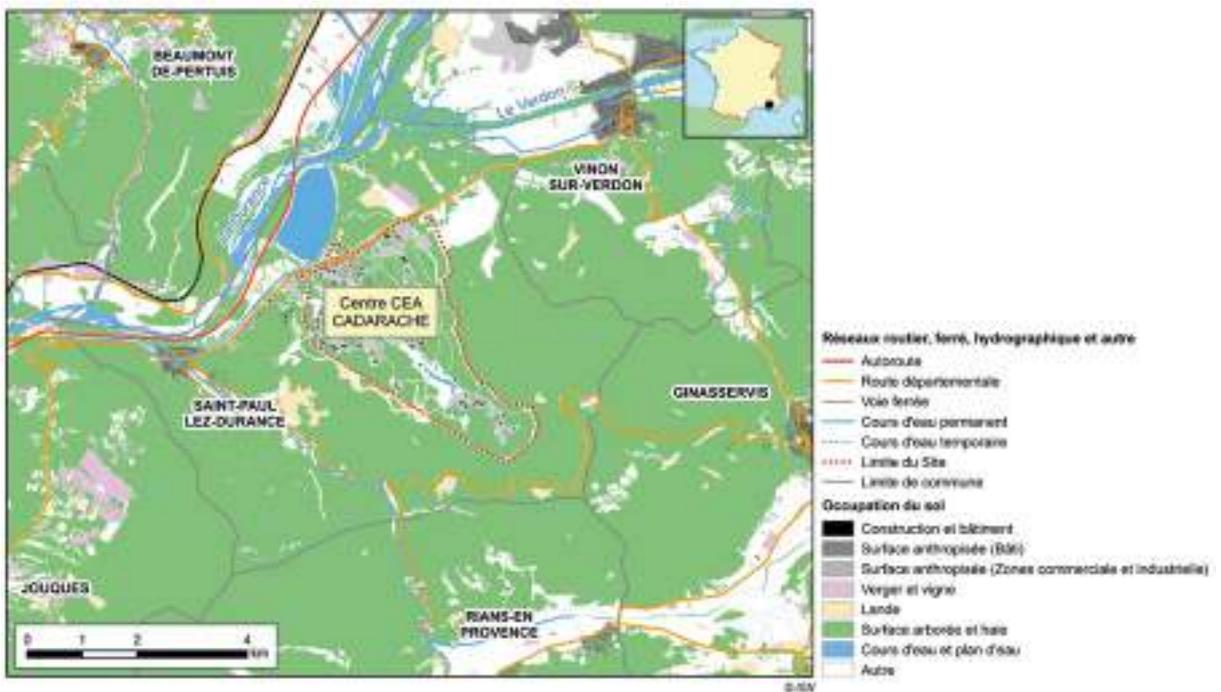


TABLEAU 1 / BILAN DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES CANALISÉS DES INB DE CADARACHE ENTRE 2017 ET 2022 (GBq/an) (source CEA)

	Tritium	Carbone-14	Gaz rares	Halogènes	Émetteurs bêta-gamma	Émetteurs alpha
2017	38	0,9	11 765	0,001	0,002	0,00001
2018	38,9	6,1	11 707	0,002	0,002	0,00001
2019	173	1,3	12 225	0,001	0,002	0,00001
2020	95	1,6	15 526	0,001	0,002	0,000009
2021	62,1	16	16 018	0,001	0,002	0,00001
2022	38,9	1,4	15 344	0,001	0,001	0,00001

TABLEAU 2 / BILAN DES EFFLUENTS RADIOACTIFS LIQUIDES REJETÉS DANS LA DURANCE ENTRE 2017 ET 2022 (GBq/an) (source CEA)

Paramètres	Tritium	Carbone-14	Mesure de l'indice d'activité alpha global	Mesure de l'indice d'activité bêta global
Activité rejetée en 2017	3,5	0,002	0,25	0,0001
Activité rejetée en 2018	0,79	0,0015	0,39	0,00008
Activité rejetée en 2019	0,82	0,0024	0,48	0,00014
Activité rejetée en 2020	4,16	0,0017	0,21	0,00003
Activité rejetée en 2021	0,48	0,0012	0,22	0,000066
Activité rejetée en 2022	0,75	0,0013	0,27	0,000075

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

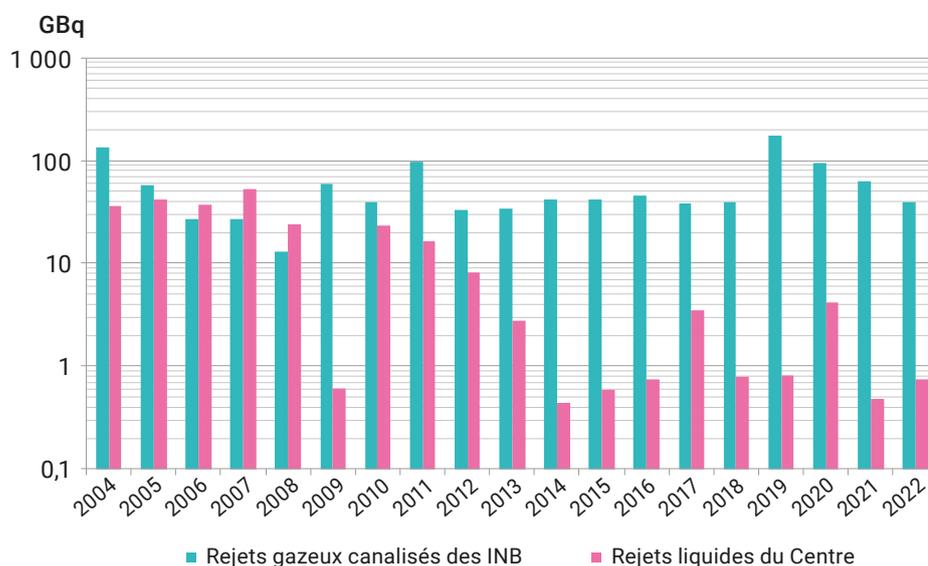


TABLEAU 3 / PLANS DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE CADARACHE RÉALISÉS PAR LE CEA ET L'IRSN

Type de prélèvement et de mesure	CEA			Type de prélèvement	IRSN		
	Fréquence annuelle	Nb de points de prélèvement	Analyses		Fréquence annuelle	Nb de points de prélèvement	Analyses
Aérosols	365	4	alpha global, bêta global	Aérosols	52	1	sp. spectrométrie gamma
Gaz	12	2	³ H, ¹⁴ C	Gaz	26	1	HTO
Radioactivité ambiante	12	15	débit de dose gamma ambiant				
Eau de cours d'eau	12	2	alpha global, bêta global : ³ H, ⁴⁰ K	Eau douce	2	1	sp. spectrométrie gamma : HTO, Sr, U, Pu
Eau de nappe	12	47	alpha global, bêta global : ³ H				
Eau de pluie	24	2	alpha global, bêta global : ³ H	Eaux atmosphériques	12	1	³ H total
Faune aquatique	1	1	spectrométries gamma et alpha : TOL, ⁹⁰ Sr, ¹⁴ C				
Lait	4	1	spectrométrie gamma	Lait	2	1	sp. spectrométrie gamma : HTO
Principales productions agricoles	1	2	spectrométries gamma et alpha	Céréales, légumes feuilles	2	2	sp. spectrométrie gamma : HTO, TOL, ¹⁴ C
Sédiments dulçaquicoles	1	1	spectrométries gamma et alpha : ⁹⁰ Sr	Sédiments	2	1	sp. spectrométrie gamma : Sr, U, Pu, Am
Sol	1	1	spectrométries gamma et alpha				
Végétaux aquatiques	1	1	spectrométries gamma et alpha : TOL, ⁹⁰ Sr				
Végétaux terrestres	4	4	sp. spectrométrie gamma				
				Vin	1	1	sp. spectrométrie gamma : HTO

lieu-dit Saint-Eucher. Les prélèvements d'eau font en particulier l'objet de mesures mensuelles des indices d'activités alpha et bêta globaux 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 annuelle. Ils font a minima l'objet de spectrométrie gamma et alpha et de mesures du strontium-90.

Un contrôle des eaux souterraines sous-jacentes aux installations est réalisé mensuellement par des prélèvements effectués à partir de 47 piézomètres. Sur ces prélèvements, sont déterminés les indices d'activités alpha et bêta globaux et ceux du tritium. Certains points font en outre l'objet d'un suivi particulier (détermination semestrielle de l'activité du strontium-90, du césium-137 et/ou des actinides (spectrométrie alpha). Les résultats de mesure correspondant, qui concernent le sous-sol intérieur du centre, ne sont pas déversés dans le RNM et ne sont pas exploités dans le présent rapport qui ne présente et ne commente que les résultats acquis à l'extérieur des centres.

Pour l'essentiel, dans le cadre de son programme de surveillance, l'IRSN réalise des prélèvements dans le compartiment atmosphérique (eau de pluie, aérosols atmosphériques et vapeur d'eau), aquatique (eau douce et sédiments) et terrestres (productions agricoles) (tableau 3).

À ces plans de surveillance viennent s'ajouter les analyses effectuées ponctuellement, par exemple à la demande de l'ASN dans le cadre d'inspections avec prélèvements dans l'environnement.

Influence du site de Cadarache sur l'environnement

Le tritium

Radionucléide prépondérant dans les rejets gazeux, les niveaux d'activités du tritium mesurés dans le compartiment atmosphérique sont faibles. Les activités volumiques en gaz tritié (HT) et en eau tritiée (HTO) effectuées par le CEA dans l'air sont toutes inférieures au seuil de décision (de l'ordre de 0,12 Bq/m³). En revanche, les résultats des analyses effectuées par l'IRSN sur les prélèvements de vapeur d'eau de l'air à l'aide de piègeurs passifs permettent de calculer une activité volumique dans l'air du tritium sous forme HTO. Entre 2020 et 2023, cette activité volumique, comprise entre 0,003 et 0,021 Bq/m³ d'air, est inchangée par rapport à la précédente période d'observation (figure 3). Bien que l'activité moyenne (0,012 Bq/m³ d'air) se situe dans la gamme de variation du bruit de fond radiologique sur la période 2021-2023, les activités mesurées sont majoritairement

supérieures à la valeur moyenne du bruit de fond de 0,008 Bq/m³, témoignant de l'influence des rejets atmosphériques tritiés du site. La dose d'inhalation consécutive à l'ajout de tritium dans l'air par le site de Cadarache est très faible et négligeable.

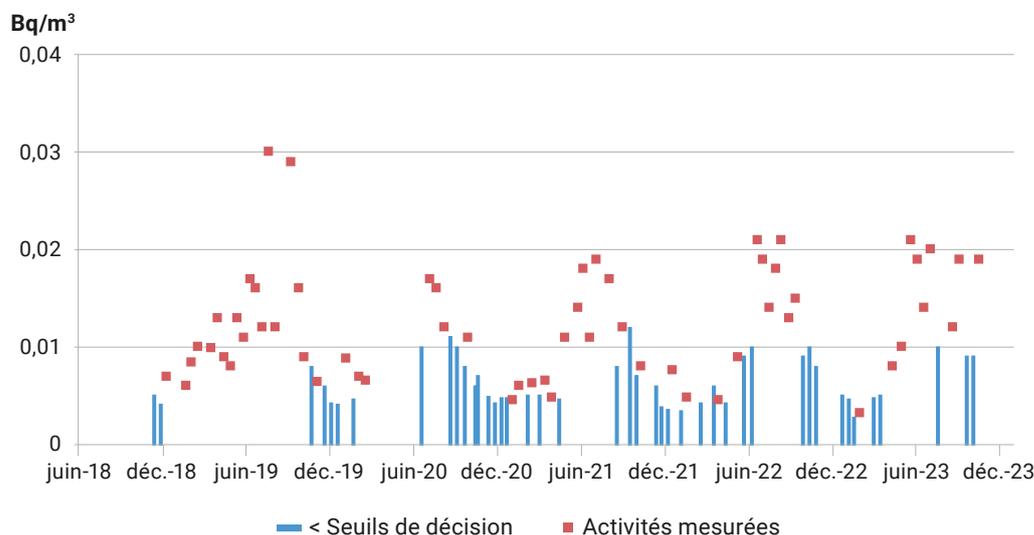
Dans les eaux de pluie collectées à proximité du site, aucune mesure de l'activité volumique de tritium n'est supérieure au seuil de décision entre 2020 et 2023 (de l'ordre de 4,2 Bq/L). Cette observation est cohérente avec les activités très faibles mesurées dans l'air, de l'ordre de 0,012 Bq/m³ d'air (à une activité de tritium de 1 Bq/L dans la vapeur d'eau de l'air correspond, dans des conditions théoriques moyennes, une activité de tritium dans l'air de 0,01 Bq/m³ d'air).

Durant la période d'observation, aucun des échantillons d'eau prélevés dans la Durance en aval du site de Cadarache et dans le canal en amont du site ne présente une activité de tritium supérieure au seuil de décision (de l'ordre de 4 Bq/L). Ainsi, depuis l'augmentation du seuil de décision, d'environ 2,2 à 4 Bq/L au début de l'année 2016, le tritium n'a plus été quantifié.

Parmi les 525 prélèvements d'eau de nappe réalisés dans 13 piézomètres localisés autour du site de Cadarache, aucune mesure de tritium n'est supérieure au seuil de décision (4 Bq/L).

Enfin, les activités de tritium dans les légumes et le lait prélevés entre 2020 et 2022 sont également inférieures au seuil de décision (0,6 Bq/kg frais et 0,7 Bq/L, respectivement).

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DE TRITIUM SOUS FORME HTO DANS L'ATMOSPHÈRE PRÉLEVÉE PAR PIÉGEUR PASSIF PAR L'IRSN SUR LE SITE DU CEA CADARACHE (Bq/m³)



Le carbone-14

Le carbone-14 atmosphérique est prélevé à l'aide de barboteurs. Les résultats obtenus entre 2021 et 2023 varient entre 0,013 et 0,075 Bq/m³ pour une valeur moyenne de l'ordre de 0,06 Bq/m³. Ces activités sont comparables à celles mesurées précédemment, entre 2018 et 2020 (0,027 à 0,090 Bq/m³). La valeur moyenne (0,06 Bq/m³) est supérieure au bruit de fond radiologique français (0,047 Bq/m³), témoignant ainsi d'une faible influence des rejets de carbone-14 du site de Cadarache (figure 4).

Les mesures réalisées dans le cadre de la surveillance radiologique ne mettent pas en évidence de carbone-14 ajouté par les rejets de Cadarache lorsque les mesures disponibles dans les légumes feuilles (18 à 19 Bq/kg frais), le lait (14 à 18 Bq/L) prélevés dans les villages avoisinants et les poissons de la Durance (24 à 25 Bq/kg frais) sont comparées aux observations réalisées en dehors de l'influence des rejets des installations nucléaires (chapitre 1).

La dose d'inhalation consécutive à l'ajout de carbone-14 dans l'air par le site de Cadarache est très faible et négligeable.

Autres radionucléides

À proximité des INB 56 (parc d'entreposage) et 164 (CEDRA), l'activité volumique de radon dans l'air est mesurée grâce à deux stations permettant d'effectuer des mesures en continu. Les valeurs moyennes observées durant la période 2020-2022 (32 et 16 Bq/m³ pour l'INB 56 et l'INB 164, respectivement) sont proches des valeurs attendues dans les Bouches-du-Rhône, où le potentiel radon est faible (chapitre 1).

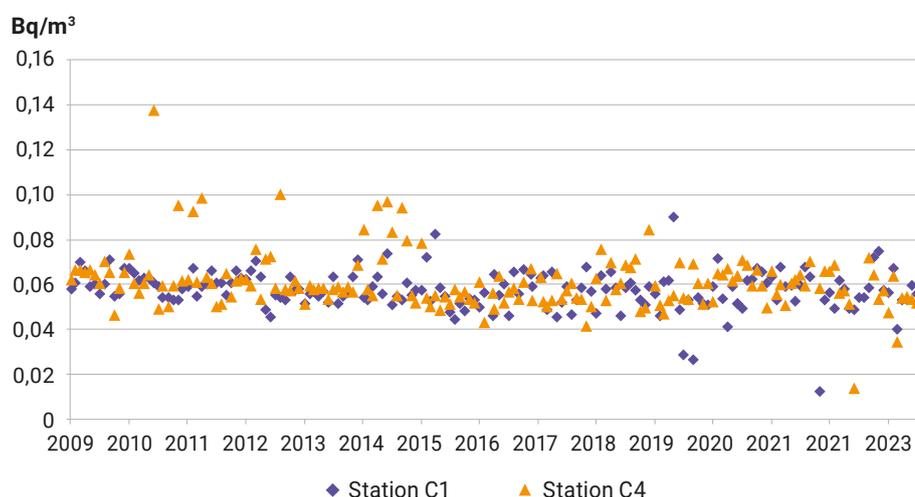
Concernant les sédiments de la rivière, des traces de césium-137 (1,12 à 1,58 Bq/kg sec) et de strontium-90 (0,50 à 0,63 Bq/kg sec) ont été décelées, elles sont imputables aux retombées atmosphériques anciennes (essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl).

Lorsqu'il est détecté, le césium-137 dans les sols, les légumes, les plantes aromatiques et le lait, présente des activités faibles, rémanentes des retombées atmosphériques anciennes. Il en va de même pour le plutonium-239+240, recherché dans les sols et les légumes.

Débits d'équivalent de dose dans l'air ambiant

Les dosimètres disposés en clôture du site donnent un débit de dose moyen de 83,3 nSv/h sur la période 2021-2023, du même niveau que l'irradiation naturelle. Seul un dosimètre situé au sud du site indique un débit de dose moyen nettement supérieur, de 138 nSv/h, sur cette même période. La dose externe induite par le site pour un promeneur adulte passant une dizaine d'heures à proximité de ce point est estimée à 0,55 µSv.

FIGURE 4 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE CARBONE-14 DANS L'AIR À PROXIMITÉ DU SITE DE CADARACHE ENTRE JANVIER 2009 ET AOÛT 2023 - BARBOTEURS DES STATIONS ATMOSPHÉRIQUES DE GINASSERVIS (C1) ET SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE (C4) (Bq/m³)



Le site du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds) à Caen

Le Grand accélérateur national d'ions lourds (GANIL) a été créé en 1976 par le CEA et le CNRS sous la forme d'un Groupement d'intérêt économique (GIE). Il est implanté sur trois communes de la communauté urbaine de Caen la mer (Caen, Épron et Hérouville-Saint-Clair) dans le département du Calvados. Ce centre de recherche est une très grande infrastructure de recherche (IR) et l'un des grands laboratoires internationaux pour la recherche utilisant des faisceaux d'ions : physique du noyau, de l'atome, de la matière condensée, astrophysique nucléaire, radiobiologie...

Le site du GANIL comprend une installation nucléaire de base (INB), l'INB n° 113 autorisée le 29 décembre 1980. Cette INB est constituée de deux installations : l'installation d'origine qui regroupe 5 cyclotrons et l'installation SPIRAL2, dont la mise en service a été autorisée en juillet 2019, qui accueille un accélérateur linéaire. Ces installations comportent des aires d'expériences pour l'utilisation et l'étude des faisceaux d'ions produits par les accélérateurs avec différents détecteurs.

FIGURE 1 / SITE DU GANIL À CAEN



© GANIL

Les rejets radioactifs

Les autorisations de rejets pour l'installation d'origine et l'installation SPIRAL2 datent du 7 juillet 2015 (décisions ASN n° 2015-DC-0515 et n° 2015-DC-0516 du 7 juillet 2015). Les modalités de rejets ont été modifiées en février 2021 (décision ASN CODEP-CAE-2021-009606).

Les rejets d'effluents gazeux sont effectués lors des campagnes de fonctionnement des accélérateurs. L'installation d'origine a été opérationnelle 13 mois et SPIRAL2 a été en fonctionnement 10,5 mois sur la période 2021-2023. En dehors de ces périodes de fonctionnement, les rejets sont essentiellement de l'ordre des seuils de décision des mesures.

Les radionucléides composant les effluents gazeux proviennent de l'activation de l'air par les neutrons et, pour une faible partie, de l'activation des matériaux par

l'interaction ions-matière. Le niveau d'activation varie selon les faisceaux d'ions accélérés (nature, intensité et énergie). Les émetteurs bêta/gamma et les gaz rares ont représenté la majorité des rejets gazeux (tableaux 1 et 2). Ils sont rejetés et mesurés après filtration via deux émissaires, SPIRAL1 et SPIRAL2. Différents dispositifs de décroissance permettent de réduire l'activité des rejets gazeux. Des rejets diffus sont également rejetés lors du fonctionnement des accélérateurs de l'installation d'origine.

Les transferts d'effluents liquides ne concernent que de petites capacités de stockage contenant des eaux faiblement tritiées (inférieures à 100 Bq/L de tritium). Ces transferts sont opérés, après contrôle, vers le réseau d'eaux usées de la communauté urbaine de Caen la Mer. Les rejets ne sont donc pas directement réalisés dans l'environnement. Les premiers transferts datent de 2021 (tableau 3).

TABLEAU 1 / ÉVOLUTION DES REJETS GAZEUX DE L'INSTALLATION D'ORIGINE DEPUIS L'AUTORISATION DE REJETS DU 7 JUILLET 2015 (GBq)

Année	Tritium	Gaz rares	Iodes	Autres émetteurs β et γ
2016	0,045	3,6	0,063	1 090
2017	0,041	5,5	0,096	641
2018	0,046	12,2	0,104	643
2019	0,077	9,9	0,026	967
2020	0,011	12,9	0,029	616
2021	0,135	8,0	0,0003	612
2022	0,092	4,5	0,0002	490
2023	0,073	8,3	0,0003	685

TABLEAU 2 / ÉVOLUTION DES REJETS GAZEUX DE L'INSTALLATION SPIRAL2 DEPUIS L'AUTORISATION DE MISE EN SERVICE DU 27 JUIN 2019 (GBq)

Année	Tritium	Gaz rares	Iodes	Autres émetteurs β et γ
2019	0,006	0,21	$8,8 \cdot 10^{-5}$	65
2020	0,036	1,90	$3,7 \cdot 10^{-4}$	267
2021	0,085	9,46	$1,2 \cdot 10^{-4}$	373
2022	0,260	36,2	$1,2 \cdot 10^{-4}$	469
2023	1,062	33,3	$1,1 \cdot 10^{-4}$	496

TABLEAU 3 / ÉVOLUTION DES TRANSFERTS D'EFFLUENTS LIQUIDES DE L'INB 113 DEPUIS L'AUTORISATION (GBq)

Année	Tritium
2021	0,814
2022	Néant
2023	0,243

La surveillance radiologique de l'environnement du site

Les mesures pour la surveillance radiologique de l'environnement et leurs fréquences ont été fixées par les prescriptions techniques de modalités de rejets et de transferts d'effluents établies conjointement aux autorisations de rejets du 7 juillet 2015 (tableau 4 et figure 2).

Pour le compartiment atmosphérique, la surveillance de l'environnement est assurée par deux stations de surveillance situées en limite du centre (figure 2). La mesure en continu du rayonnement gamma ambiant est réalisée par l'exploitant. Les mesures dans l'air en différé du tritium, des iodes et des aérosols (mesures quotidiennes en bêta global et mensuelles en spectrométrie gamma) sont sous-traitées à des laboratoires agréés par l'ASN. Sur une des stations, les précipitations sont analysées bimensuellement (activités tritium et bêta global).

Les eaux des deux bassins d'orage du site sont prélevées et analysées mensuellement (tritium et bêta global). Cinq piézomètres sur le site permettent la surveillance des eaux souterraines biannuellement (^3H , ^{40}K et bêta global) en amont et aval du site.

Des mesures par spectrométrie gamma sont réalisées chaque mois sur deux prélèvements de végétaux à 1 et 5 km sous les vents dominants, ainsi que sur un prélèvement de lait. Ces mesures sont complétées annuellement par des analyses de tritium. Chaque année, une campagne de mesure sur des productions agricoles (spectrométrie gamma et tritium, potassium-40) et de la couche superficielle de sol (spectrométrie gamma) est réalisée sur des prélèvements effectués à 1 et 5 km du site.

Par ailleurs, des dosimètres mensuels sont disposés dans cinq communes autour du site et en cinq points en limite de site.

Le GANIL fait également l'objet d'un suivi régulier du tritium atmosphérique de la part de l'IRSN par le déploiement d'un piègeur passif tritium au sud du site sous les vents dominants (mesure bimensuelle de la fraction HTO du tritium dans l'air).

TABLEAU 4 / PLAN DE SURVEILLANCE DU SITE DU GANIL

Milieu surveillé ou nature du contrôle	GANIL
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> 2 stations sur site de prélèvement continu : mesures quotidiennes β global d'aérosols et mesures mensuelles spectrométrie γ d'aérosols, iodes et ^3H
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> 2 stations sur site de prélèvement continu : mesures continues par sondes γ 5 points en limites de site et 5 points dans l'environnement : mesures mensuelles par dosimètres environnement
Précipitations/pluies	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de collecte de précipitations sur une station sous les vents : mesures bimensuelles β global et ^3H 2 points de prélèvement d'eaux de pluie : mesures mensuelles β global et ^3H
Lait	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement : mesure mensuelle par spectrométrie γ et mesure annuelle de ^3H
Végétaux (herbes)	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement (1 et 5 km sous les vents) : mesure mensuelle par spectrométrie γ et mesure annuelle de ^3H libre
Produits agricoles	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvement (dont 1 et 5 km sous les vents) : mesures annuelles : spectrométrie γ, ^3H libre et lié, ^{40}K
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement (1 et 5 km sous les vents) : mesure annuelle par spectrométrie γ
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> 5 points de prélèvement sur le site : mesures biannuelles β global, ^3H, ^{40}K

FIGURE 2 / REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE DU PLAN DE SURVEILLANCE DU GANIL

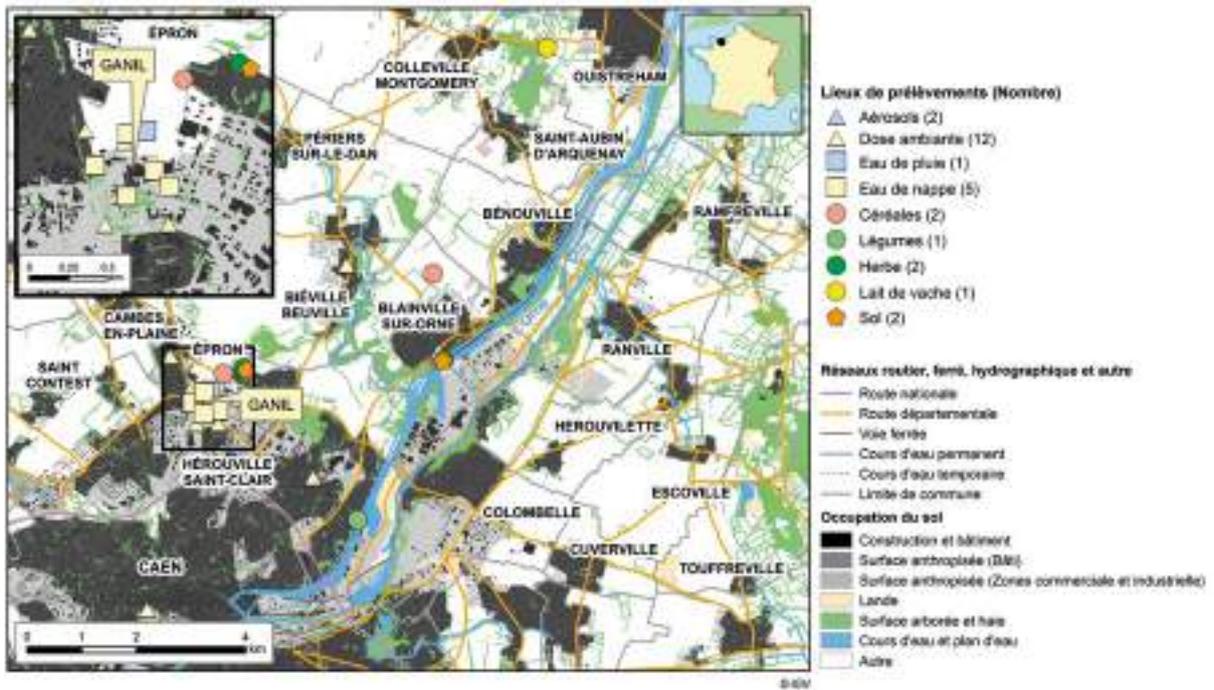


FIGURE 3 / VUE D'UNE STATION DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT



© GANIL

Influence du GANIL sur l'environnement

Parmi les radionucléides recherchés sous forme gazeuse dans l'atmosphère (iode-131, tritium) par le GANIL, aucune mesure ne présente de résultat supérieur au seuil de décision (soit 0,2 mBq/m³ pour l'iode-131 et 0,1 Bq/m³ pour le tritium) pour la période 07-2021/2023.

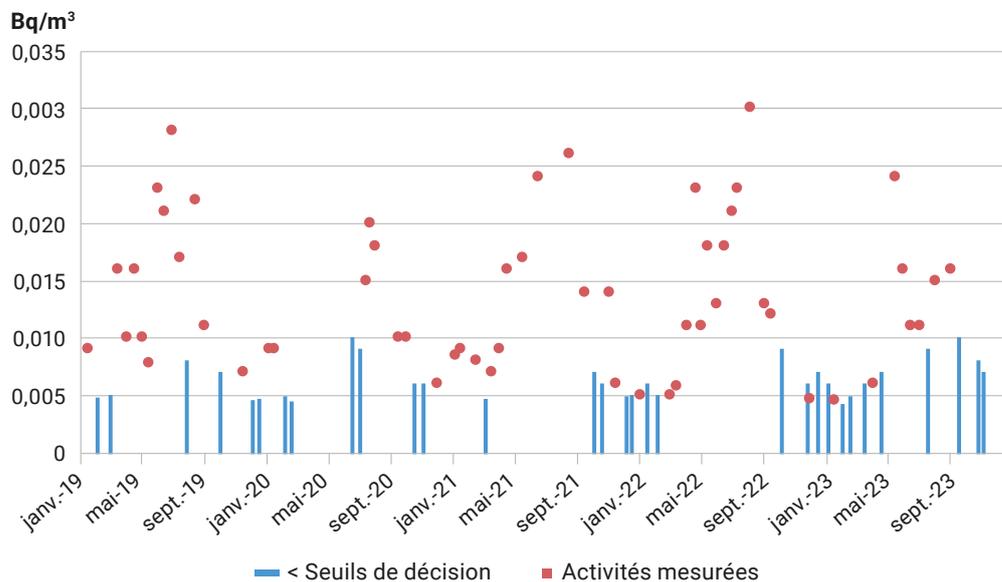
Les résultats obtenus pour la période 2021-2023 à partir des prélèvements de l'IRSN par piègeur passif montrent des niveaux faibles de tritium sous forme de vapeur d'eau (HTO) de l'air (65 % de valeurs significatives), cependant proches du bruit de fond et des performances métrologiques (SD de 0,005 à 0,01 Bq/m³). Les activités s'étendent de 0,005 à 0,03 Bq/m³ (figure 4).

Dans les eaux de pluie collectées à proximité du site, le tritium n'a pas été mesuré au-delà du seuil de décision de l'ordre de 3 Bq/L sur la période 2021-07/2023. Il en est de même pour les mesures effectuées sur les échantillons prélevés dans la nappe phréatique.

En ce qui concerne le compartiment terrestre et les denrées, les résultats obtenus ne relèvent que de la radioactivité d'origine naturelle (⁴⁰K, ⁷Be...). Aucun des radionucléides d'origine artificielle recherchés n'a présenté d'activité supérieure aux seuils de décision au cours de la période 2021-2023.

Compte tenu du niveau des activités relevées dans l'environnement à proximité du site du GANIL et des seuils de décision métrologiques, l'influence des rejets de radionucléides du site n'est pas décelable dans l'environnement.

FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE HTO DANS L'AIR À PROXIMITÉ DU GANIL À PARTIR DES PRÉLÈVEMENTS DE L'IRSN PAR PIÉGEUR PASSIF (Bq/m³)



Le site CEA de Fontenay-aux-Roses

Le site de Fontenay-aux-Roses (figure 1) du centre CEA Paris-Saclay est implanté sur le plateau de Fontenay-aux-Roses dans les Hauts-de-Seine en zone urbaine, à moins de dix kilomètres au sud/sud-ouest de Paris (figure 2). Il est regroupé administrativement depuis le 1^{er} février 2017 au site de Saclay (situé dans l'Essonne). Depuis 2007, les installations nucléaires de base (INB 165 et INB 166) du centre sont en arrêt définitif. Le programme d'assainissement des laboratoires et des installations nucléaires de ces INB a été initié dès 1999. Une demande de modification des décrets de démantèlement du 30 juin 2006, n° 2006-772

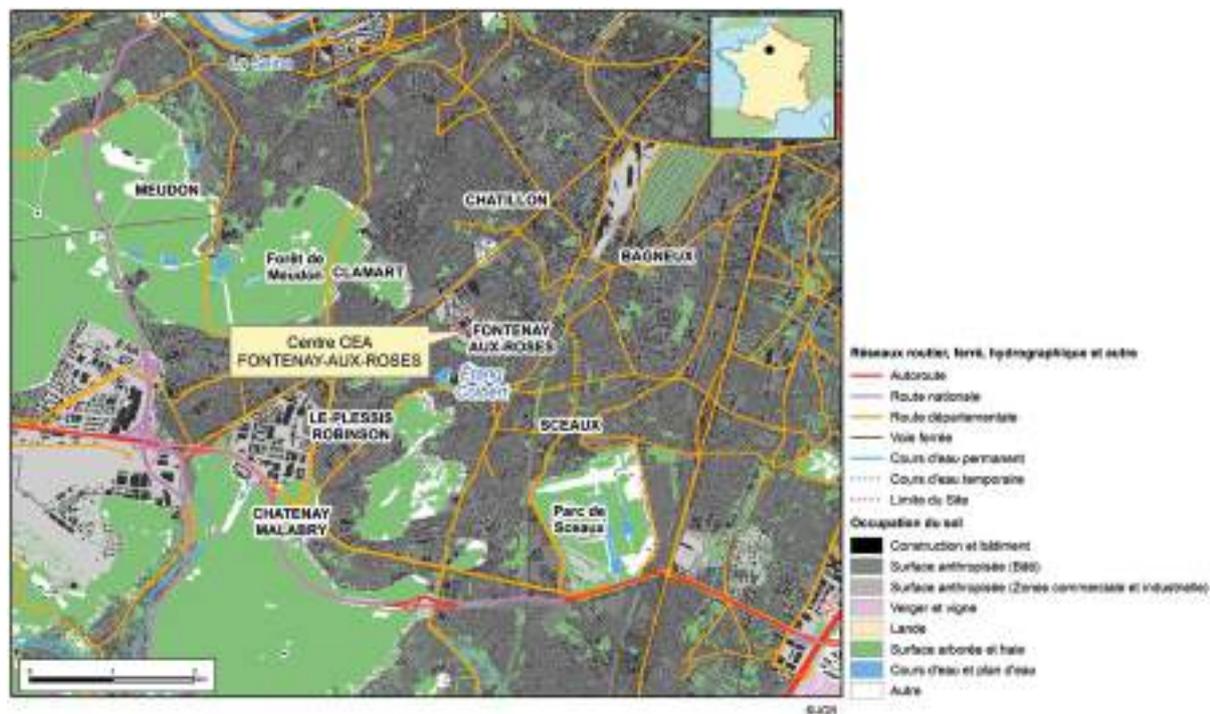
pour l'INB 165 et n° 2006-771 pour l'INB 166, a été déposée respectivement les 12 janvier et le 30 mars 2018. Les installations nucléaires du site de Fontenay-aux-Roses laissent ainsi la place au développement d'activités situées essentiellement dans le domaine des sciences du vivant au sein de trois départements et un service de l'IBFJ (Institut de biologie François Jacob) appartenant à la DRF (Direction de la recherche fondamentale) du CEA. En 2022, dans le cadre du projet NeurATRIS (*European Advanced Translational Research Infrastructure for Neuroscience*) l'un de ses départements MIRCEN (*Molecular Imaging Research Center*) s'est d'ailleurs agrandi d'un cyclotron et d'un laboratoire de radiochimie.

FIGURE 1 / LE SITE DE FONTENAY-AUX-ROSES DU CENTRE CEA PARIS-SACLAY



© CEA

FIGURE 2 / LOCALISATION DU SITE DE FONTENAY-AUX-ROSES DU CENTRE CEA PARIS-SACLAY



Les rejets radioactifs

Rejets directs d'effluents atmosphériques dans l'environnement

L'air des INB du site de Fontenay-aux-Roses est filtré par deux barrières de filtres THE (très haute efficacité) avant rejet dans l'environnement. Les rejets atmosphériques de ces INB s'effectuent au moyen de neuf émissaires qui comprennent chacun un ou plusieurs filtres de prélèvement en continu des aérosols. Ces filtres de prélèvement se trouvent en aval des filtres THE et ils sont relevés périodiquement pour mesures en différé des indices d'activités alpha et bêta globaux. Trois de ces émissaires sont également pourvus de supports

adsorbants de prélèvement en continu des halogènes, permettant spécifiquement la mesure en différé de l'iode-131 et de l'iode-129. Ces neuf émissaires sont également équipés de balises de contrôle en temps réel de l'activité des aérosols émetteurs bêta, parmi lesquels cinq suivent également l'activité des aérosols émetteurs alpha. Quatre d'entre eux sont par ailleurs équipés d'un contrôle pour la mesure en continu des gaz radioactifs, malgré l'absence systématique de rejet de gaz rares par les INB (depuis l'arrêt en 1995 des opérations sur combustible irradié).

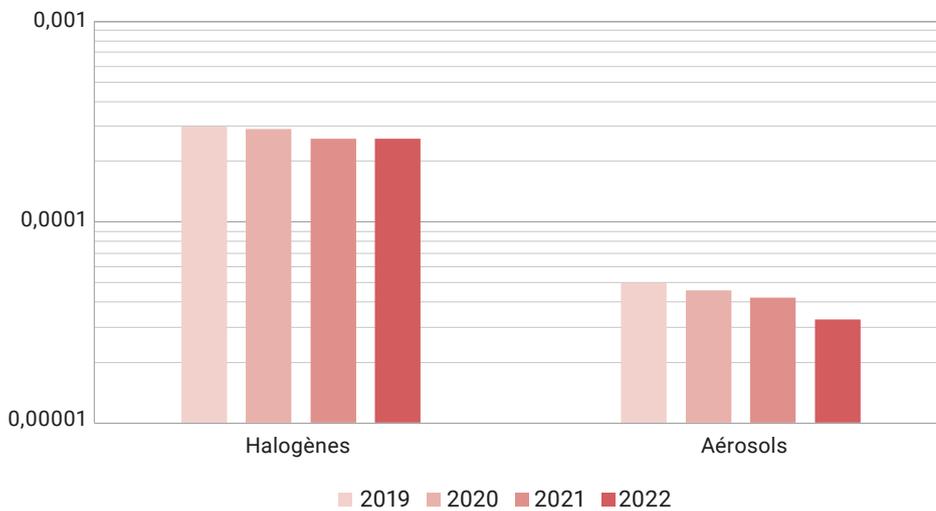
L'activité totale « halogènes + aérosols bêta » rejetée reste quant à elle inférieure à 0,0005 GBq/an depuis 2019 (figure 3).

La baisse observable sur la figure 3, principalement imputable aux halogènes, s'explique par un changement des équipements de mesure pour des appareils plus performants permettant d'atteindre des seuils de décision (SD) plus faibles.

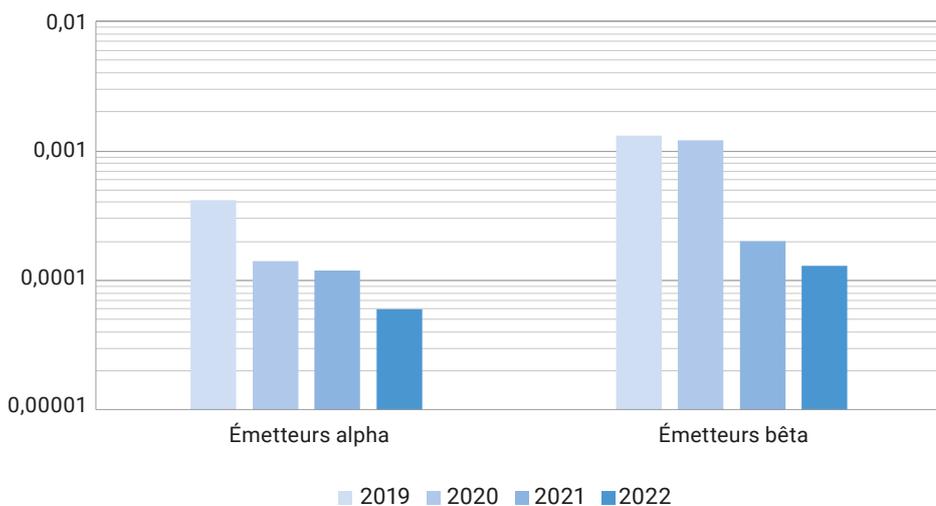
Les activités annuelles des rejets cumulés en aérosols bêta et halogènes sont très faibles, elles représentent moins de 0,01 % de la limite fixée par l'arrêté interministériel de mars 1988 qui régleme les autorisations de rejets atmosphériques du site de Fontenay-aux-Roses⁽¹⁾.

FIGURE 3 / REJETS ANNUELS ATMOSPHÉRIQUES ET LIQUIDES DES INSTALLATIONS DU SITE DE FONTENAY-AUX-ROSES SUR LA PÉRIODE 2019-2022 (GBq/an)

Rejets atmosphériques (GBq)



Transferts d'effluents liquides (GBq)



(1) Arrêté interministériel du 30 mars 1988 relatif à l'autorisation de rejets d'effluents radioactifs gazeux par le centre d'études nucléaires de Fontenay-aux-Roses.

Transferts d'effluents liquides dans l'égout urbain

Les liquides contenant des substances radioactives sont collectés dans des cuves puis évacués vers une filière nucléaire. Les autres effluents sont recueillis dans des cuves tampons, puis transférés vers l'égout urbain après autorisation et vérification de leur conformité avec la réglementation en vigueur (activités volumiques, activité totale rejetée, concentrations physico-chimiques de l'effluent). La station de contrôle des effluents de l'égout urbain, située en aval immédiat du centre, est 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. 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 site de Fontenay-aux-Roses.

La surveillance radiologique des transferts d'effluents liquides (figure 3) porte sur les émetteurs alpha (mesure globale), les émetteurs bêta-gamma (mesure globale) et le tritium.

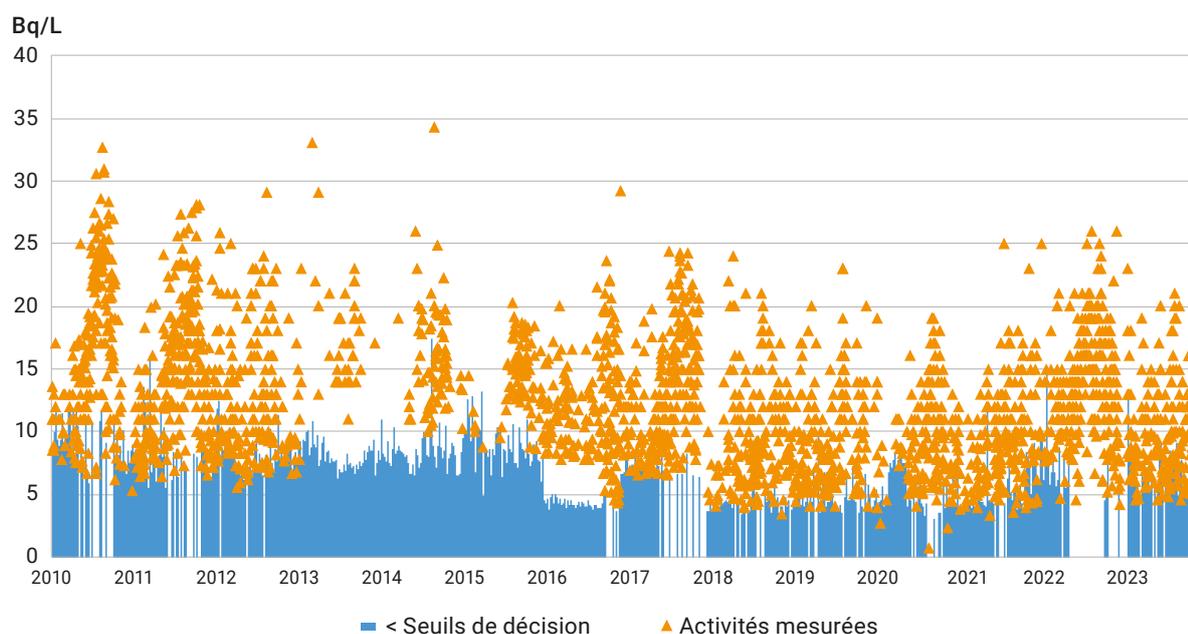
La baisse d'activité en émetteurs alpha et bêta dans les effluents liquides du centre est à mettre au regard des activités d'assainissement des INB désormais plus orientées vers du traitement de déchets.

Les activités annuelles des transferts d'effluents liquides en émetteurs alpha et des émetteurs bêta (hors tritium) sont très faibles, elles représentent moins de 1 % de la limite fixée par l'arrêté interministériel de mars 1988 qui réglemente les autorisations de rejets liquides du site de Fontenay-aux-Roses⁽²⁾.

Les INB du centre étant à l'arrêt depuis plusieurs années, les activités annuelles des effluents radioactifs atmosphériques et liquides sont désormais très largement inférieures aux limites réglementaires. Pour cette raison, les arrêtés d'autorisation de rejets d'effluents radioactifs du site de Fontenay-aux-Roses sont en cours de révision avec l'ASN afin d'adapter ses limites de rejets radiologiques et physico-chimiques ainsi que sa surveillance de l'environnement au plus près de la situation actuelle des INB 165 et 166 en cours d'assainissement en vue de leur démantèlement.

Les activités volumiques de tritium mesurées dans les émissaires des transferts d'effluents liquides du site dépassent régulièrement 10 Bq/L sans toutefois être imputables aux rejets du centre (figure 4). En effet, des activités du même ordre sont mesurées dans l'eau de la Seine qui approvisionne le site de Fontenay-aux-Roses. Elles sont liées aux rejets du centre nucléaire de production d'électricité d'EDF de Nogent.

FIGURE 4 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM DANS LES EAUX PRÉLEVÉES PAR HYDROCOLLECTEUR DANS L'ÉGOUT URBAIN DU SITE DE FONTENAY-AUX-ROSES ENTRE 2010 ET 2023 (Bq/L) (données CEA)



(2) Arrêté interministériel du 30 mars 1988 relatif à l'autorisation de rejets d'effluents radioactifs liquides par le centre d'études nucléaires de Fontenay-aux-Roses.

La surveillance radiologique de l'environnement du site

Le centre de Fontenay-aux-Roses effectue près de 2 600 mesures par an d'échantillons issus de tous les compartiments de l'environnement (atmosphérique, aquatique et terrestre) dans un rayon de 6 km autour du centre.

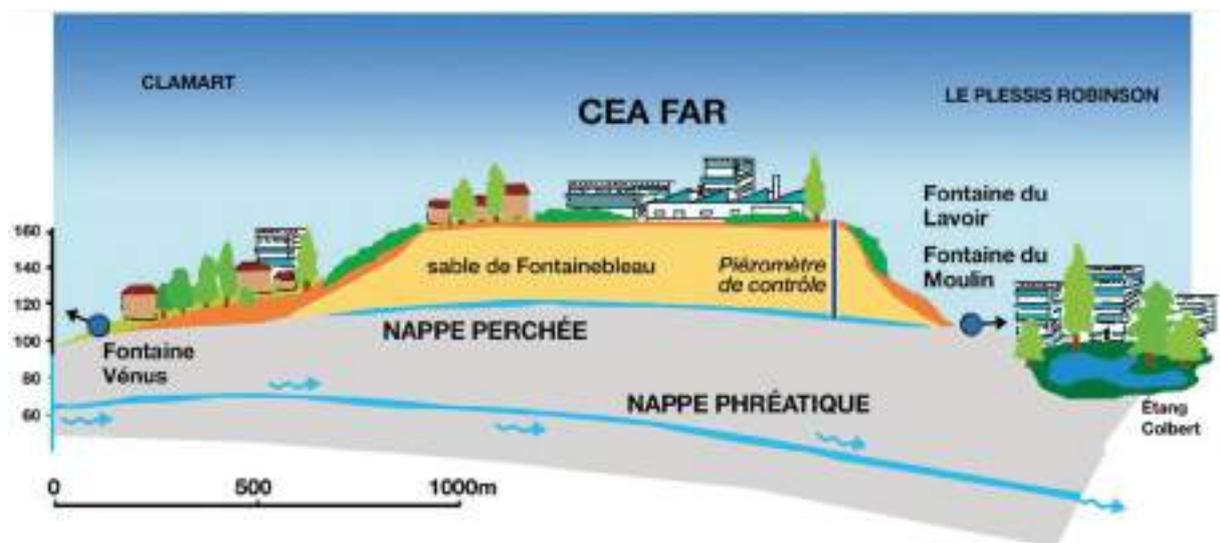
La surveillance atmosphérique est réalisée à partir de mesures effectuées dans quatre stations fixes (FAR Atmos, FAR2, Clamart et Bagneux), situées à des distances allant de 0,2 à 2 km autour du site. La surveillance de l'air comprend le suivi des activités alpha et bêta mesurées sur les poussières atmosphériques collectées sur des filtres, la recherche d'halogène et la mesure de l'irradiation ambiante.

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 site. Les eaux de pluie collectées au moyen de pluviomètres (2 pluviomètres de 1 m² et 2 pluviomètres de 0,04 m² de surface de collecte) au niveau des deux stations FAR Atmos et FAR2 font l'objet de mesures des indices d'activités alpha et bêta globaux ainsi que de tritium.

La nappe perchée, située entre 60 et 65 mètres de profondeur au-dessus de la nappe phréatique générale (figure 5), est surveillée mensuellement par l'analyse en laboratoire de prélèvements effectués dans huit forages (piézomètres). Deux points de résurgence de la nappe perchée, la fontaine du Lavoir et la fontaine du Moulin à Fontenay-aux-Roses, font également l'objet d'un contrôle mensuel. La surveillance des eaux de surface se fait par des prélèvements périodiques effectués au niveau de l'étang Colbert situé à proximité du site. Les prélèvements d'eau font systématiquement l'objet de mesures des indices d'activités alpha et bêta globaux ainsi que de tritium. En complément une recherche des émetteurs gamma est effectuée sur les eaux souterraines et les eaux de surface. L'IRSN assure par ailleurs des prélèvements semestriels pour analyse sur les deux fontaines et dans l'étang.

Des échantillons 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 et annuels d'échantillons de sol (en surface) dans les quatre stations de surveillance extérieures au centre). Ces échantillons font l'objet d'une recherche des radionucléides émetteurs gamma. À cela s'ajoute une surveillance des eaux résiduaires et des boues de l'égout urbain, exutoire du site de Fontenay-aux-Roses.

FIGURE 5 / SCHÉMA DE COUPE EN SOUS-SOL SOUS LE SITE CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES (source CEA)



Le tableau 1 synthétise les plans de surveillance CEA et IRSN du site de Fontenay-aux-Roses.

TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE CEA ET IRSN DU SITE DE FONTENAY-AUX-ROSES

Milieu surveillé ou nature du contrôle	CEA	IRSN
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> 15 balises dans l'environnement, dont 1 sous les vents dominants 	<ul style="list-style-type: none"> 1 balise dans l'environnement à Fontenay-aux-Roses : débit de dose γ ambiant
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> Aérosols atmosphériques : 4 points de prélèvement, dont 1 sous les vents dominants : indices α et β globaux (quotidiennes), spectrométrie γ sur regroupement mensuel des filtres quotidiens, si α et β global > 2 mBq/m³ Halogène pour 2 stations : iode-131 	
Eau de pluie	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement, dont 1 sous les vents dominants : indices α et β globaux, tritium pour le point sous les vents dominants (quadrimestrielles) 	
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> 8 points de prélèvement sur site : indices α et β globaux, tritium et spectrométrie γ (de mensuelles à annuelles) 2 points de prélèvement (fontaines) : indice β global, tritium et spectrométrie γ (mensuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement : tritium, spectrométrie α et ⁹⁰Sr (semestrielles)
Eaux de surface	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (étang Colbert) : indices α et β globaux, tritium et spectrométrie γ (mensuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (étang Colbert) : tritium, uranium, spectrométrie γ, spectrométrie α et ⁹⁰Sr (semestrielles)
Eau d'égout	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (égout collecteur en aval des rejets) : indices α et β globaux, tritium (en continu) 	
Herbe	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement : spectrométrie γ (mensuelle) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement : spectrométrie γ, spectrométrie α (annuelles)
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement : spectrométrie γ (annuelle) 	
Boues des égouts	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement au niveau de l'égout collecteur en aval des rejets (mensuel) : indices α et β globaux et spectrométrie γ 	

Influence du centre CEA de Fontenay-aux-Roses sur l'environnement

Parmi les radionucléides d'origine artificielle recherchés dans l'air sous forme d'aérosols ou gazeuse, aucune mesure ne présente de résultat supérieur aux seuils de décision (soit 1 mBq/m³ pour l'iode-131 et 0,7 µBq/m³ pour le césium-137).

L'analyse des radionucléides des eaux de l'étang Colbert ne met en évidence aucun radionucléide d'origine artificielle. Depuis 2014, le tritium n'était plus détecté au-delà des seuils de décision métrologique (de 2,5 à 5,8 Bq/L). Pour la période 2021-2023, il existe deux mesures significatives de 3,7 Bq/L et 4,4 Bq/L relevées en octobre 2021 par le CEA et en mai 2023 par l'IRSN. Néanmoins, ces activités présentent de fortes incertitudes ($\pm 3,3$ Bq/L et ± 2 Bq/L) et sont proches du seuil de décision métrologique moyen sur la période 2021-2023.

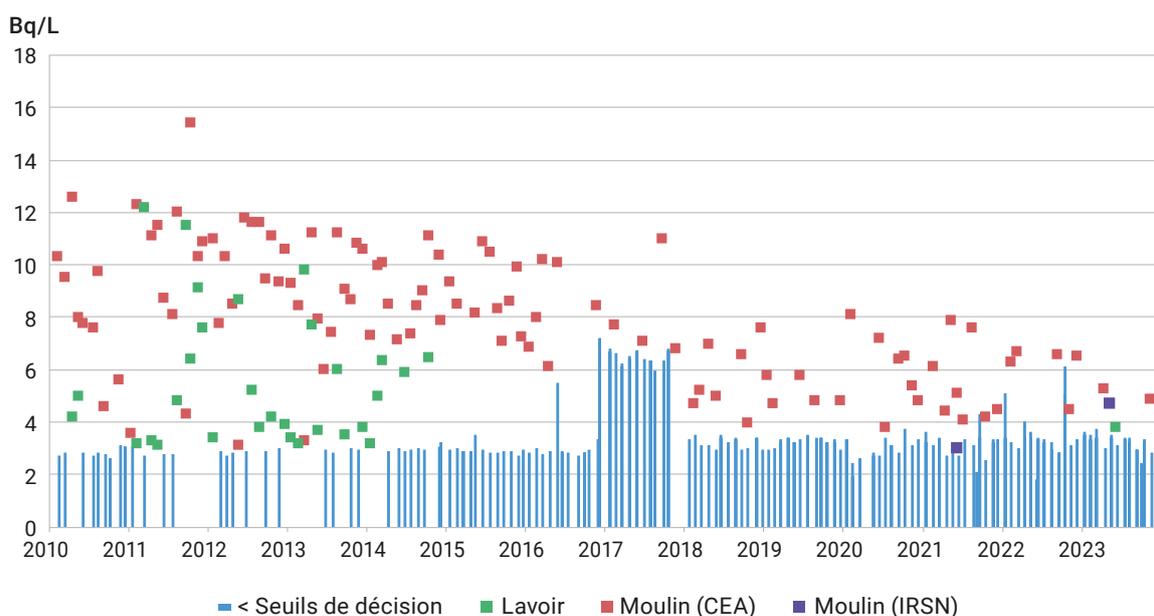
Les activités volumiques de tritium des eaux souterraines prélevées à la Fontaine du Moulin ont diminué régulièrement depuis 2010 pour se stabiliser depuis 2016 entre le seuil de décision métrologique (3 à 7 Bq/L) et 8 Bq/L (figure 6). Les activités de tritium des eaux prélevées à la Fontaine du Lavoir sont toutes restées inférieures au seuil de décision depuis 2014.

Seul le prélèvement de juin 2023 du CEA présente une activité de 3,8 Bq/L. Néanmoins, cette activité, qui présente une très forte incertitude ($\pm 3,5$ Bq/L), est proche du seuil de décision métrologique moyen sur la période 2021-2023.

En ce qui concerne le compartiment terrestre, les résultats associés aux prélèvements d'herbe effectués à proximité du centre de Fontenay-aux-Roses par le CEA ne relèvent que de la radioactivité d'origine naturelle (⁴⁰K, ⁷Be...). Les activités de cobalt-60 (< 0,3 Bq/kg sec) et de césium-137 (6 à 10 Bq/kg sec) mesurées par le CEA, sur les prélèvements de sol effectués en 2021 et 2022 à la station de surveillance FAR2, sont dans la gamme des activités mesurées hors influence d'installation nucléaire, en revanche l'activité de 6,6 Bq/kg sec d'américium-241 mesurée en 2022 témoigne d'un marquage lié aux activités passées du site.

L'ensemble des résultats de mesures radiologiques acquis autour du centre du CEA de Fontenay-aux-Roses entre 2021 et 2023, confirme que les rejets radioactifs de ce site, qui figurent parmi les plus faibles de tous les sites nucléaires français, n'ont pas d'influence sur leur environnement décelable par des mesures.

FIGURE 6 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM DANS LES EAUX SOUTERRAINES À PROXIMITÉ DU CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES ENTRE 2010 ET 2023 (Bq/L) (données CEA)



Centre CEA et Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble

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

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 portant homologation de la décision de l'ASN de déclassement de l'INB 61 (LAMA) est paru le 13 octobre 2017, tandis que celui concernant les INB 38 et 79 est paru le 27 mars 2023.

FIGURE 1 / SITE DE L'ILL À GRENOBLE



Les rejets radioactifs

Le contrôle des effluents radioactifs gazeux de l'ILL est assuré au niveau de 2 émissaires, en aval des systèmes de filtration des effluents. Les rejets atmosphériques 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 en temps réel et par un prélèvement représentatif hebdomadaire mesuré en laboratoire pour établir le spectre des radionucléides gazeux.

Le tritium est le radionucléide le plus abondant dans les rejets gazeux de l'ILL (figure 2 et tableau 1), suivi par les gaz rares (principalement l'argon-41) avec des activités rejetées 10 fois plus faibles et le carbone-14. En ce qui concerne les rejets d'halogènes et d'aérosols, les activités rejetées sont rarement supérieures aux seuils de décision qui sont de l'ordre de quelques millièmes de l'autorisation de rejet. Les rejets atmosphériques du centre CEA de Grenoble ont cessé en juillet 2013 avec l'arrêt définitif de la ventilation, consécutif 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 3 à 4 ordres de grandeurs plus importantes que celles du carbone-14 et celles dues aux rejets d'émetteurs bêta/gamma (tableau 2).

Signalons également que le réacteur est resté à l'arrêt durant l'année 2022 pour permettre à l'ILL d'effectuer la maintenance de son parc d'instruments, ceci s'étant traduit par des rejets atmosphériques et liquides nettement inférieurs à ceux des autres années.

En ce qui concerne le centre CEA de Grenoble, il n'y a plus d'effluents liquides radioactifs provenant des INB du centre depuis février 2009.

TABLEAU 1 / ÉVOLUTION DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES (gaz rares, tritium, carbone-14) DE L'ILL ENTRE 2021 ET 2023 (TBq)

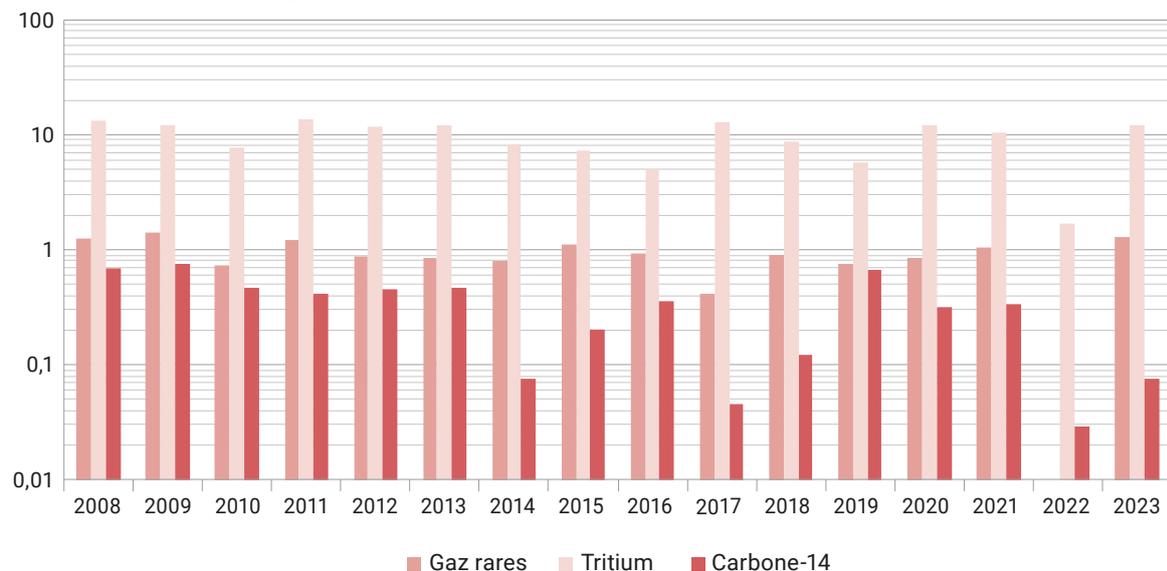
Année	Gaz rares	Tritium	Carbone-14
2021	1,05	10,3	0,34
2022	4,2E-6	1,7	0,029
2023	1,3	12,0	0,075

TABLEAU 2 / ÉVOLUTION DES REJETS LIQUIDES (tritium, carbone-14 et émetteurs bêta-gamma) DE L'ILL ENTRE 2021 ET 2023 (GBq)

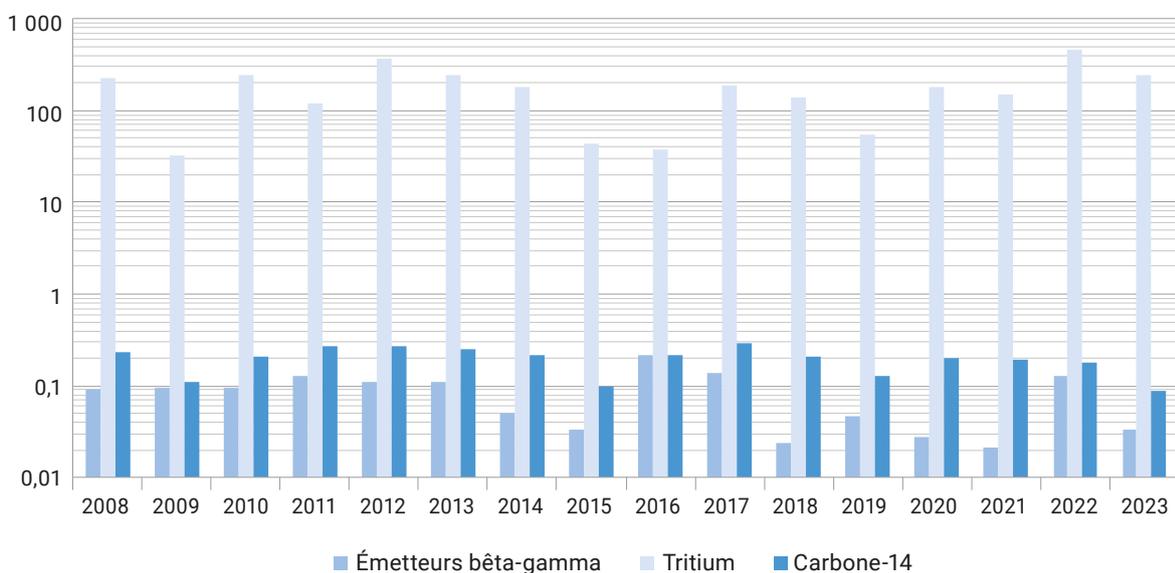
Année	Tritium	Carbone-14	Émetteurs bêta/gamma
2021	150	0,19	0,021
2022	462	0,18	0,13
2023	240	0,089	0,033

FIGURE 2 / ÉVOLUTION DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES (gaz rares, tritium et carbone-14) (TBq/an) ET LIQUIDES (GBq/an) DE L'ILL DEPUIS 2008

Rejets atmosphériques (TBq)



Rejets liquides (GBq)



La surveillance radiologique de l'environnement du site

Depuis juillet 2013, les rejets radioactifs des INB du centre 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 (tableau 3) :

- 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 Saint-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 :

- 2 300 prélèvements d'échantillons par an dans l'air ambiant (aérosols sur filtres, tritium, gaz sur cartouches à charbon actif), l'eau (eaux de pluie, eaux de nappes phréatiques, eaux des rivières Drac et Isère), les denrées alimentaires et bioindicateurs terrestres (lait, herbe, productions agricoles) et aquatiques (poissons, roseaux), les sols et sédiments (figure 3). Ces prélèvements donnent lieu à près de 2 400 analyses en laboratoire par an ;
- 1 800 mesures en continu et en différé sont exploitées par an (dosimétrie ambiante par dosimétrie passive et active).

L'objectif est de s'assurer de l'absence d'impact radiologique sur l'environnement et la chaîne alimentaire dans la cuvette grenobloise.

L'IRSN réalise également une surveillance complémentaire à celle de l'exploitant (tableau 3).

Influence des rejets du site de l'ILL sur son environnement

Les rejets tritiés sont de loin les plus importants et les seuls à rendre compte de l'influence du réacteur de recherche de l'ILL dans l'environnement.

La surveillance du tritium dans l'air est réalisée toutes les semaines à l'aide de barboteurs implantés sous les vents dominants⁽¹⁾ : au sud-est du site (station « extérieure » de l'ILL) et au nord-ouest (station « pylône » de l'ILL et station de l'IRSN situées à la confluence du Drac et de l'Isère). À partir de 2022, l'IRSN a utilisé une méthode d'analyse du tritium plus performante qui s'est traduit par une augmentation significative de détection du tritium dans l'air (figures 3 et 4) : alors qu'il n'était que de 45 % en 2021, le taux de détection du tritium sous forme de vapeur d'eau tritiée atteint plus de 90 % en 2022-2023. L'activité moyenne s'établit à 0,11 Bq/m³ entre 2021 et 2023 (activités volumiques comprises entre 0,024 et 0,71 Bq/m³). Lorsqu'il est détecté, le tritium sous forme de vapeur d'eau tritiée est systématiquement mesuré avec une activité supérieure à l'activité moyenne du bruit de fond radiologique (environ 0,008 Bq/m³ d'air), ce qui témoigne d'une nette influence du fonctionnement de l'ILL. Il en est de même du tritium sous forme HT qui, bien que moins fréquemment détecté, provient essentiellement de l'ILL. Notons enfin que les résultats de mesure de l'ILL, lorsqu'ils sont supérieurs au seuil de décision, sont similaires aux résultats de mesure obtenus par l'IRSN.

Le tritium est également mesuré à fréquence hebdomadaire, par l'ILL, dans les eaux de pluie prélevées à proximité du site (figure 6). Lors des précédents bilans, la station située au nord-ouest permettait un meilleur taux de détection du tritium dans l'eau de pluie. Ce n'est plus le cas sur la période 2021-2023 où le tritium a été quantifié dans environ 50 % des échantillons analysés, qu'ils proviennent de la station nord-ouest ou de la station sud-est. L'activité maximale de 66 Bq/L d'eau de pluie a été mesurée à la station sud-est en décembre 2023 tandis que la station nord-ouest enregistrait une activité maximale de 34 Bq/L en janvier 2023. Cela témoigne de conditions météorologiques sensiblement différentes durant la période de prélèvement et illustre également la variabilité observée sur la figure 4, en partie attribuable aux conditions de dispersion atmosphériques locales.

(1) Avant 2015, les activités de tritium dans l'air étaient mesurées sans distinction des formes chimiques (tritium total) (cf. Bilan radiologique 2015-2017, figure 4 p. 220).

TABEAU 3 - PLAN DE SURVEILLANCE DE L'ILL

Milieu surveillé ou nature du contrôle	ILL	IRSN
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> 4 points mesures en continu du débit de dose (station météo du site, Saint-Martin-d'Hères, Sassenage, Grenoble) 	
Aérosols atmosphériques	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement (station météo du site, Saint-Martin-d'Hères, Sassenage, Grenoble) : β global (quotidienne) et γ sur regroupement (mensuelle) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (station météo du site) : γ (hebdomadaire)
Gaz	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement (station météo du site, Saint-Martin d'Hères, Sassenage, Grenoble) : γ, et 2 points (station météo et Grenoble), tritium (hebdomadaire) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (station météo du site) : γ, tritium (hebdomadaires)
Eau de pluie	<ul style="list-style-type: none"> 2 points (station météo du site et Grenoble) : β global et tritium (mensuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (station météo du site) : tritium (hebdomadaire)
Lait	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (Proveysieux) : β global, γ et tritium (mensuels), carbone-14 (annuelle) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (Herbeys) - γ, tritium (semestrielles)
Herbe	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement (station météo du site et St-Martin-d'Hères) : β global, γ et tritium (mensuelles), carbone-14 (annuelle) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement (station météo du site et Saint-Martin-le-Vinoux) : γ, tritium libre et lié, carbone-14 (annuelles)
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (station météo du site) : β global, γ et tritium (annuelle) 	
Légumes	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (Fontanil-Cornillon) : β global, γ, tritium et carbone-14 (annuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (Herbeys ou Sassenage) : γ, tritium libre et lié, carbone-14 (annuelles)
Céréales	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement (Voreppe) : β global, γ, tritium et carbone-14 (annuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement en 2021 (Herbeys), puis 2 à partir de 2022 (Herbeys et Uriage-les-Bains) : γ et carbone-14 (annuelles)
Eaux de surface	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement (Drac et Isère en amont, Isère en aval proche du site et Isère en aval lointain) : β global et tritium (mensuelles, sauf sur aval proche : hebdomadaires) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement (Isère en amont et Isère en aval proche du site) : tritium (hebdomadaire)
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> 15 piézomètres : β global et tritium (mensuelles) 	
Sédiments	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement (Isère en aval du site) : β global, tritium et carbone-14 (annuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement (Isère en amont et Isère en aval proche du site) : γ (annuelle)
Végétaux aquatiques	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement (Isère en aval du site) : β global, γ, tritium et carbone-14 (annuelles) 	
Poissons	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement (Isère en aval du site) : β global, tritium et carbone-14 (annuelles) 	

FIGURE 3 / LOCALISATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT AUTOUR DE L'ILL (CEA et IRSN)

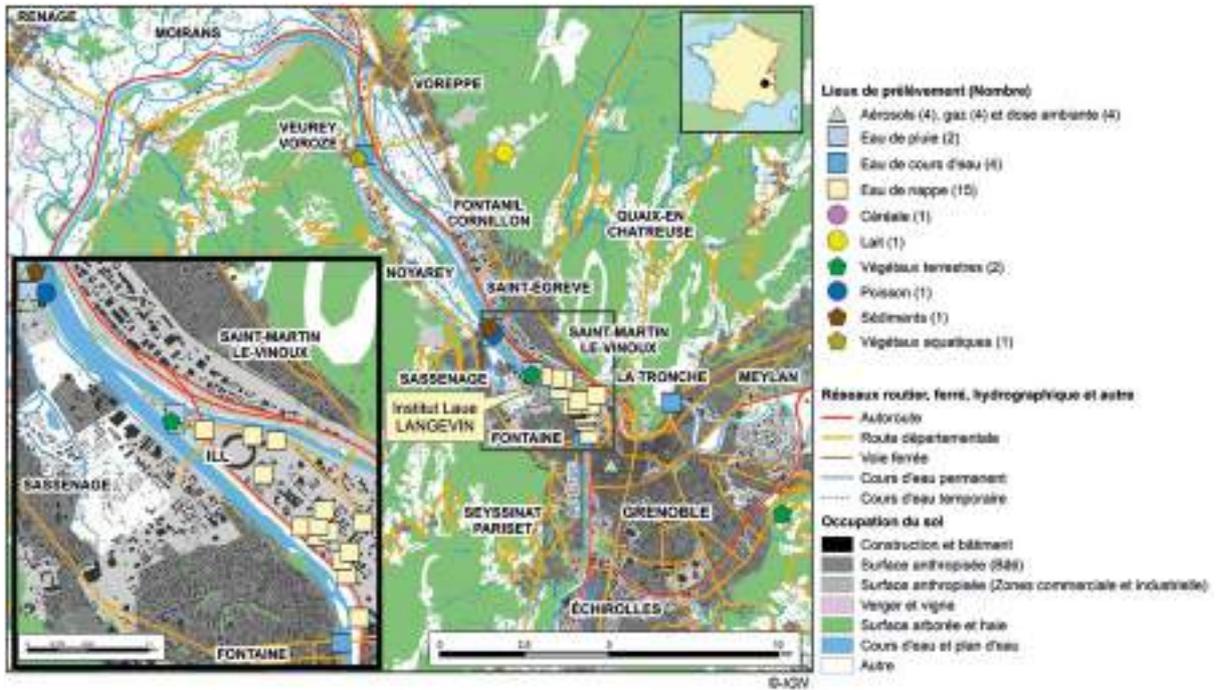


FIGURE 4 / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DE TRITIUM LIBRE (HTO) DANS L'AIR À PROXIMITÉ DE L'ILL (Bq/m³) ENTRE 2015 ET 2023 (données ILL et IRSN)

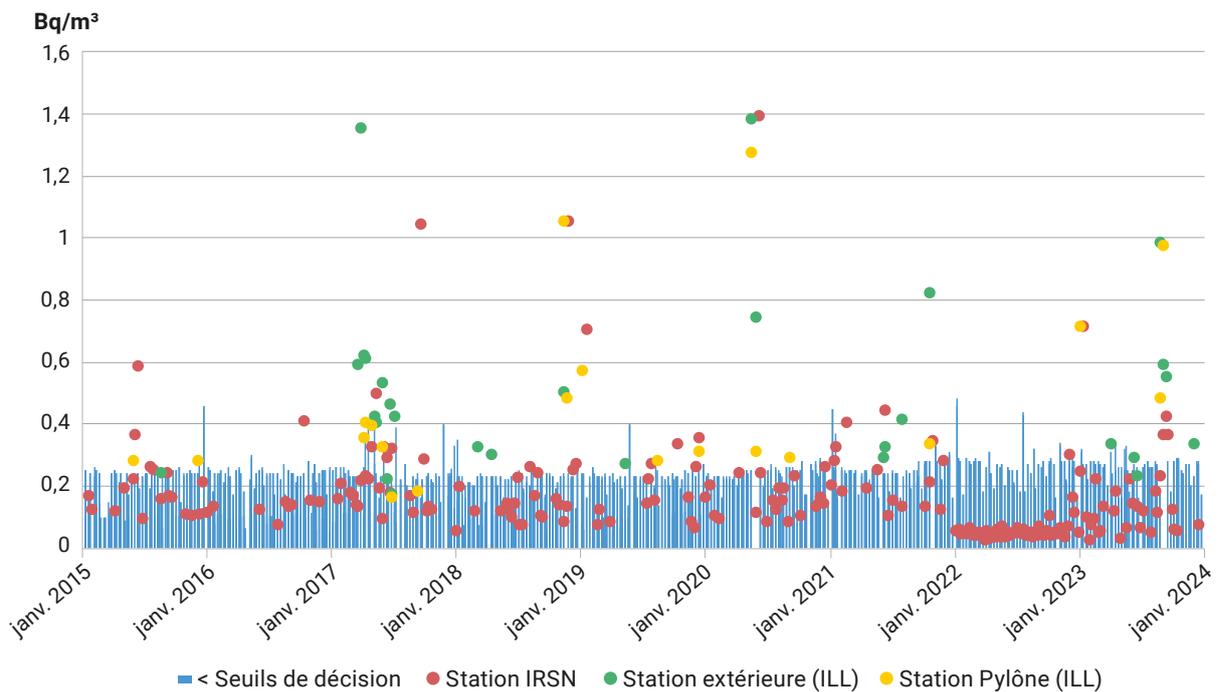


FIGURE 5 / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DE TRITIUM GAZEUX (HT) DANS L'AIR À PROXIMITÉ DE L'ILL (Bq/m³) ENTRE 2015 ET 2023 (données ILL et IRSN)

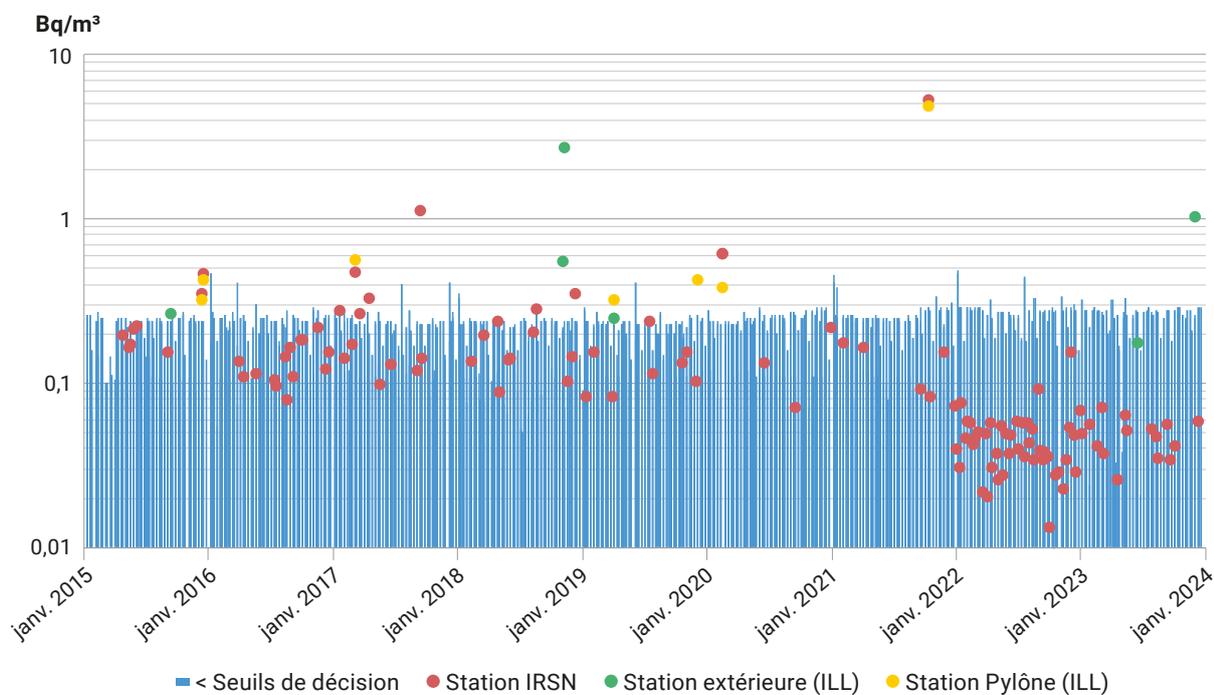


FIGURE 6 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE À PROXIMITÉ DU CENTRE ILL (Bq/L) ENTRE JANVIER 2010 ET DÉCEMBRE 2023 (données ILL et IRSN)

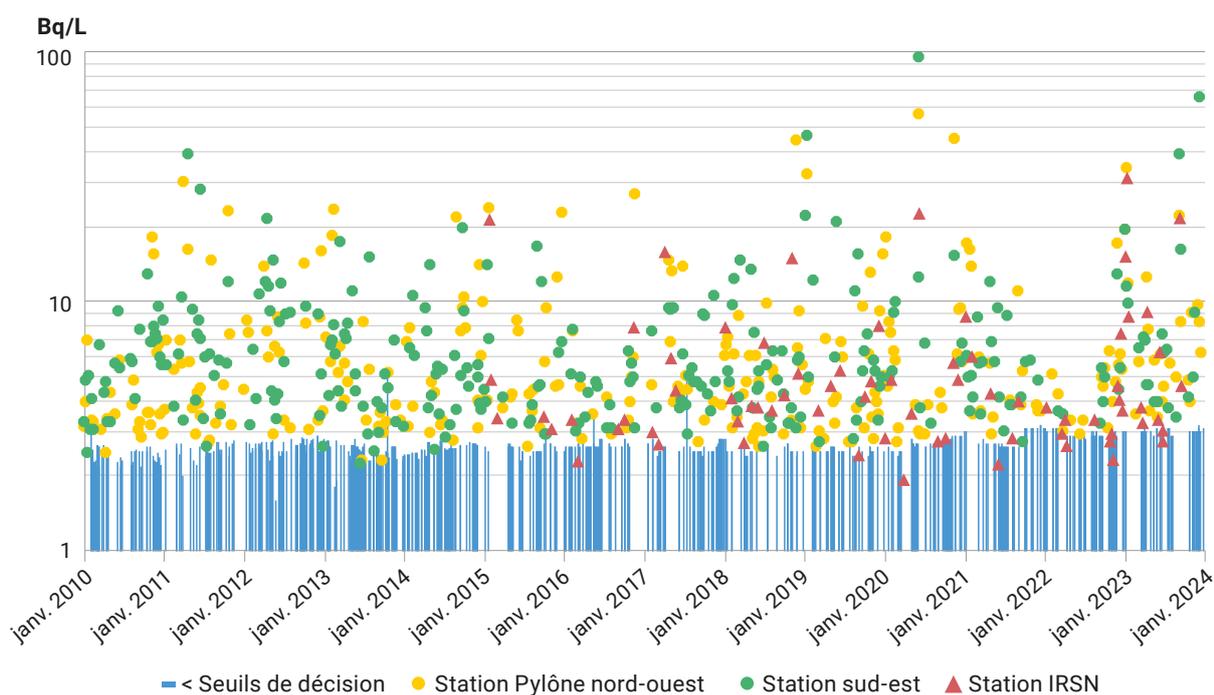
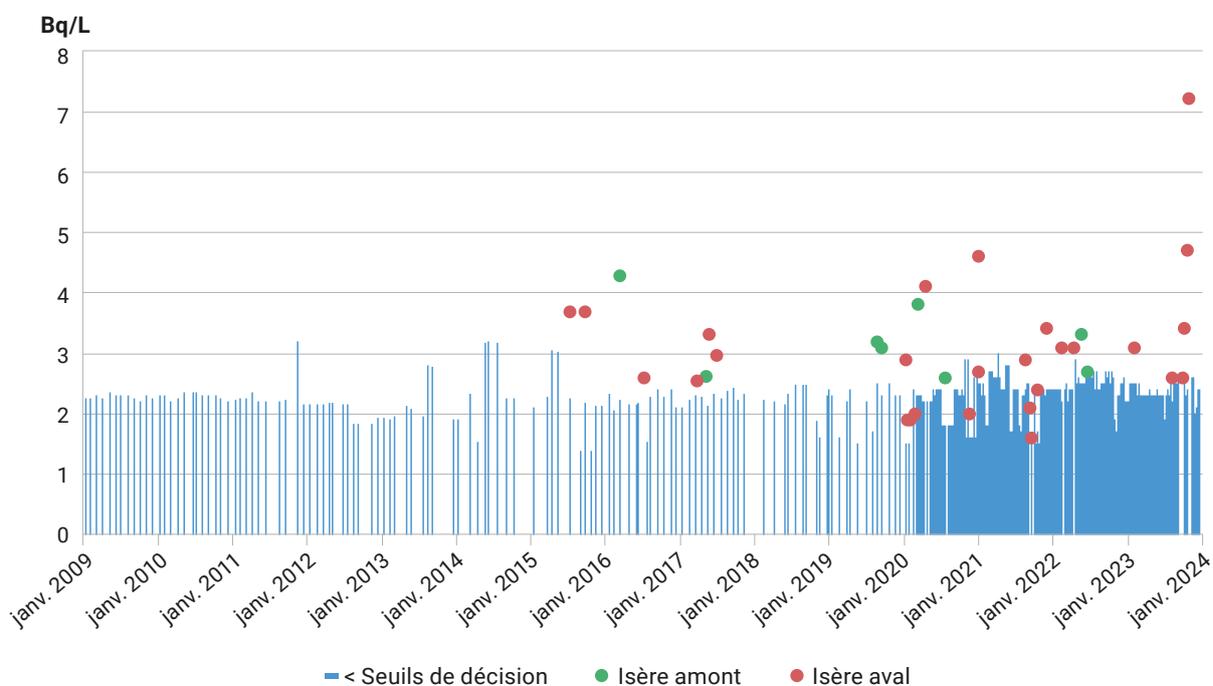


FIGURE 7 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM DANS L'ISÈRE⁽²⁾ (Bq/L) ENTRE 2009 ET 2023 (données IRSN)



Les activités moyennes de tritium dans l'eau de pluie à ces 2 stations sont très proches (respectivement 5,5 Bq/L à la station sud-est et 5,1 Bq/L à la station nord-ouest) entre 2021 et 2023, soit du même ordre de grandeur que ce qui avait été mesuré au cours de la période 2018-2020 et plus de 6 fois supérieures à l'activité moyenne du bruit de fond radiologique (de l'ordre de 0,8 Bq/L).

La station IRSN, située à proximité de la station nord-ouest de l'ILL, permet de mesurer une activité de tritium supérieure au seuil de décision dans moins de 50 % des cas. Les activités volumiques mesurées, comprises entre 2,2 et 30,9 Bq/L sont proches de celles mesurées par l'ILL.

Comme pour les activités mesurées dans l'air, tous ces résultats témoignent de l'influence des rejets de l'ILL dans l'environnement et de la baisse des rejets atmosphériques de tritium en 2022.

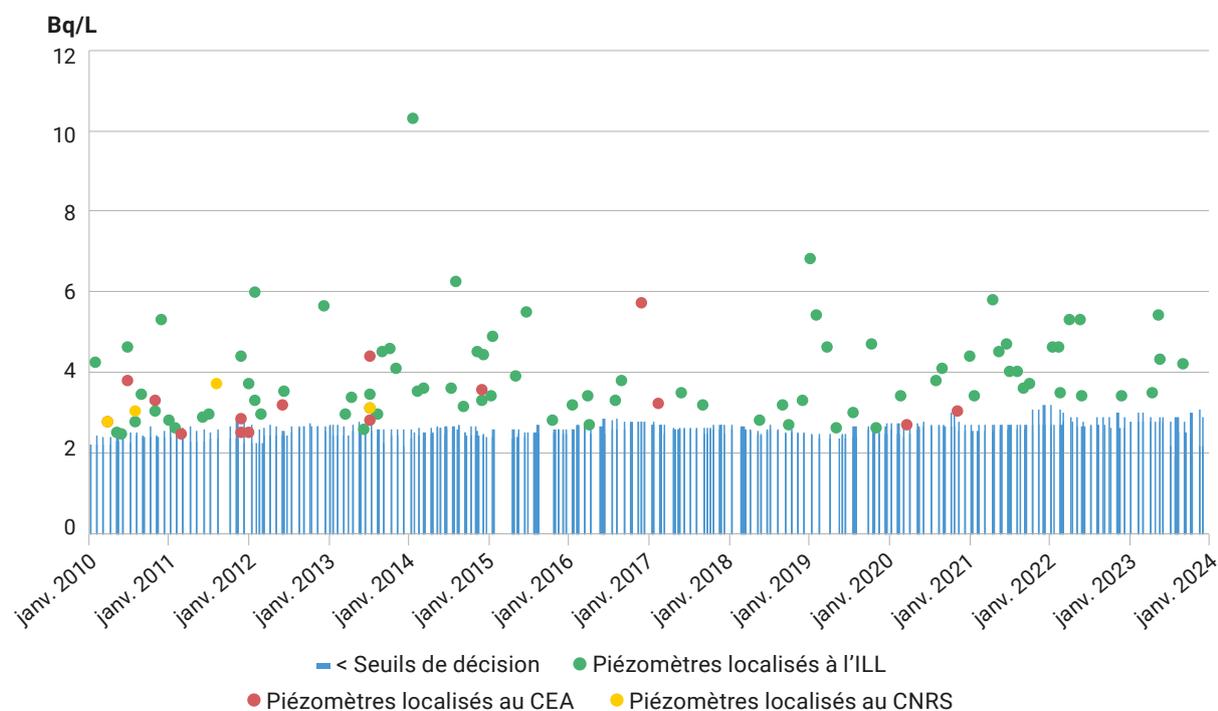
En ce qui concerne les cours d'eau, le tritium a été quantifié à 7 reprises par l'ILL sur la période 2021-

2023, dans l'Isère en amont du site. Toutefois, les incertitudes associées ne permettent pas de distinguer ces activités de celle du bruit de fond de tritium qui est aujourd'hui en moyenne de l'ordre de 0,8 Bq/L. L'IRSN, qui réalise des prélèvements à fréquence hebdomadaire n'a pu quantifier le tritium qu'à 14 reprises au cours de ces trois années. Seuls 5 résultats à l'aval du site de l'ILL présentent des activités supérieures au bruit de fond, témoignant de l'influence des rejets liquides de tritium dans l'Isère. Ainsi, les rejets de tritium de l'ILL marquent de manière très sporadique les eaux de l'Isère en aval du site.

Concernant les eaux souterraines et comme sur la période précédente, quelques valeurs acquises entre 2021 et 2023 sur les piézomètres localisés dans l'enceinte du site de l'ILL, témoignent de l'influence du fonctionnement de l'installation (figure 8). Notons que les prélèvements d'eau effectués au niveau des piézomètres localisés autour de l'ESRF (accélérateur européen) depuis 2018, n'ont pas permis de mesurer le tritium dans la nappe sous-jacente.

(2) Jusqu'en 2018, l'IRSN prélevait dans le Drac aval.

FIGURE 8 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM DANS LES EAUX DE NAPPE SITUÉES À PROXIMITÉ DE L'ILL (Bq/L) ENTRE 2010 ET 2023 (données IRSN)



Les prélèvements mensuels d'herbe sont réalisés de mai à novembre par l'ILL. Sur la période 2021-2023, le tritium libre est moins fréquemment détecté qu'au cours de la période précédente (entre 35 % et 58 % contre 45 à 91 % entre 2018 et 2020 ; figure 9). Les activités sont du même ordre de grandeur que celles acquises précédemment (comprises entre 1,9 et 9,6 Bq/kg frais). Le tritium organiquement lié n'est jamais quantifié dans les échantillons d'herbe analysés par l'ILL. Les mesures de tritium libre acquises à proximité du site par l'IRSN à fréquence annuelle (depuis 2015) sont comprises entre 2,6 et 9,4 Bq/L, en cohérence avec les activités mesurées par l'ILL. Les activités de tritium organiquement lié varient de 0,4 à 0,9 Bq/kg frais (2,6 à 6,2 Bq/L d'eau de combustion). Les activités les plus élevées de tritium libre et lié, témoignent de l'influence ponctuelle des rejets tritiés de l'ILL.

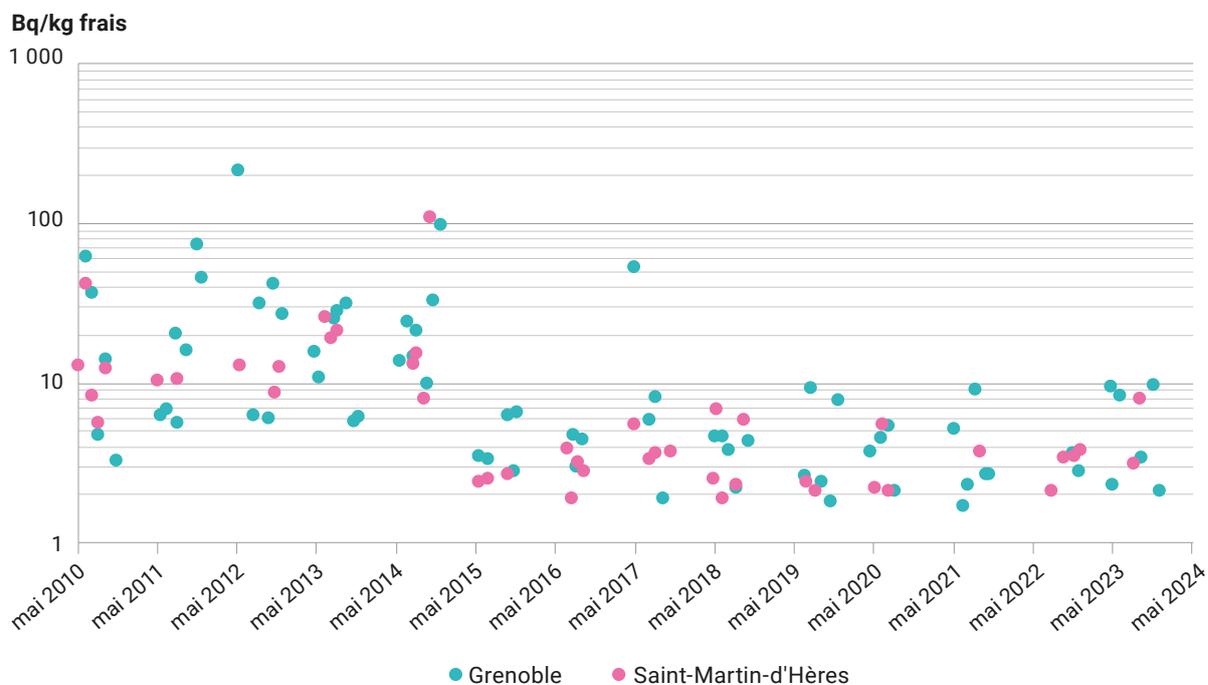
Dans les productions agricoles prélevées par l'IRSN et l'ILL à fréquence annuelle (blettes, salades, maïs, blé), seul le tritium libre est quantifié à des activités supérieures aux seuils de décision. Les résultats s'inscrivent dans la gamme de mesure du tritium dans l'herbe (0,4 à 5 Bq/kg frais). Les résultats acquis sur ces productions permettent de mettre en évidence une influence ponctuelle des rejets tritiés de l'ILL au cours de la période 2021-2023.

L'activité de carbone-14 mesurée dans l'herbe prélevée annuellement par l'ILL à Saint-Martin-d'Hères et sur son site varie de 59,1 à 206 Bq/kg sec entre 2020 et 2022. Ces activités, fluctuantes d'une année sur l'autre, sont cependant proches de celles mesurées en 2018 et 2020 (28,9 à 109 Bq/kg sec) et proches du bruit de fond, à l'exception d'une mesure réalisée fin mai 2022.

Les résultats acquis par l'IRSN dans l'herbe entre 2020 et 2023 évoluent de 98 à 95 Bq/kg sec (229,8 à 221,8 Bq/kg C) et ne témoignent d'aucune influence des rejets du site de l'ILL sur l'environnement terrestre.

Les résultats de mesure acquis dans le maïs (de moins de 45 à 72,6 Bq/kg sec) sont équivalents à ceux acquis au cours de la période 2018-2020 (de moins de 8 à 61 Bq/kg sec) tout comme ceux obtenus dans les salades (5,2 à 13,7 Bq/kg frais). Ces résultats restent proches de la gamme de variation du bruit de fond de carbone-14 dans ces matrices (en moyenne de l'ordre de 80 Bq/kg frais dans les céréales et de 6 Bq/kg frais dans les salades).

FIGURE 9 / ACTIVITÉ MASSIQUE DE TRITIUM DANS L'HERBE DE PRAIRIE PRÉLEVÉE À GRENOBLE ET À SAINT-MARTIN-D'HÈRES (Bq/kg frais) ENTRE JANVIER 2010 ET DÉCEMBRE 2023



Dans le compartiment aquatique, les analyses réalisées sur les poissons, sédiments et végétaux présentent des activités de césium-137 supérieures aux seuils de décision. Les valeurs obtenues témoignent de la rémanence dans l'environnement de ce radionucléide issu des retombées atmosphériques globales. Le carbone-14 mesuré dans les poissons (de moins de 7 à 39,9 Bq/kg frais) reste du même ordre de grandeur ou légèrement supérieur au bruit de fond de ce radionucléide. Dans les roseaux, l'activité massique du carbone-14 varie de moins de 58 à 143 Bq/kg sec. L'activité la plus élevée pourrait témoigner d'un apport de carbone-14 anthropique mais il est difficile de l'affirmer en l'absence de prélèvements à l'amont du site et sans correction de la mesure par la teneur en carbone (variable d'une espèce prélevée à l'autre).

Évaluation dosimétrique

Sur la base de l'activité moyenne de tritium dans l'air calculée entre 2021 et 2023 par l'IRSN (0,11 Bq/m³), la dose par inhalation et par transfert transcutané potentiellement reçue par une personne qui résiderait au niveau de la station de prélèvement serait de l'ordre

de 0,031 µSv/an. En considérant que les denrées produites localement sont à l'équilibre avec cette activité mesurée dans l'air, ce qui est très pénalisant du fait de la proximité du site, et pour une consommation de denrées locales telle que décrite dans l'annexe du présent document, la dose par ingestion serait de l'ordre de 0,014 µSv/an. Les activités mesurées dans les eaux ne sortant pas significativement du bruit de fond, la dose liée à une ingestion potentielle d'eau n'est pas considérée. La dose totale due aux rejets tritiés de l'ILL, estimée sur la base des mesures, serait donc de l'ordre de 0,045 µSv/an. Enfin, la valeur de carbone-14 obtenue dans les poissons ne modifie pas l'estimation de l'évaluation dosimétrique par ingestion (ajout de 0,0002 µSv/an).

Cette évaluation s'inscrit dans la gamme de celles réalisées par l'ILL sur la base de ses rejets gazeux de 2021 et 2022 : 0,16 et 0,014 µSv/an respectivement pour un adulte. Cette évaluation de dose est inférieure à l'estimation fournie dans le précédent bilan radiologique pour la période 2018-2020 (0,071 µSv/an), en lien avec des rejets inférieurs, notamment durant l'année d'arrêt du réacteur en 2022.

Le site de Marcoule (Gard)

Rejets et plans de surveillance

Le site de Marcoule (Gard, figure 1) héberge une vingtaine d'installations dont cinq INB :

- le réacteur Phénix (INB 71) exploité par le CEA : réacteur à neutrons rapides, arrêté en 2009 ;
- l'INB 148 Atalante exploitée par le CEA : cette installation permet de réaliser des travaux de recherche fondamentale et de radiochimie sur des éléments radioactifs de haute activité ;
- l'INB 151 Melox exploitée par Orano Recyclage : a été créée pour recycler le plutonium issu du parc électronucléaire REP français. C'est aujourd'hui la seule usine française à produire du combustible MOX ;
- l'INB 160 Centraco exploitée par Cyclife France : mise en service en 2000, elle traite les déchets et effluents radioactifs de faible activité, afin de réduire le volume avant stockage sur les centres de l'ANDRA ;
- l'INB 170 Gammatec exploitée par STERIS : cette installation abrite des irradiateurs gamma à visée de recherche et développement.

Le site comprend également une installation nucléaire de base secrète (INBS) exploitée par le CEA. Les principales installations de cette INBS sont arrêtées et en cours de démantèlement :

- l'usine UP1, première installation industrielle française de retraitement du combustible usé ;
- les réacteurs Célestin 1 et 2 ont été mis à l'arrêt définitif fin 2009 ;
- l'Atelier Tritium de Marcoule (ATM) a été définitivement arrêté en juin 2012.

À noter également, la présence sur le site de Marcoule de l'ICPE CISBIO (rubrique 2797 de la nomenclature des ICPE notamment) exploitée par la société REVVITY dans le cadre de la production de produits destinés à l'analyse médicale *in vitro*.

Les effluents liquides radioactifs produits sur le site sont transférés à la STEL (station de traitement des effluents liquides) exploitée par le CEA. L'INB Centraco dispose de sa propre station de traitement d'effluents liquides et procède à leurs rejets. Il n'est pas possible d'individualiser précisément les rejets par installation. Les rejets gazeux sont quant à eux répartis entre les différentes installations du site (Atalante, Phénix, Centraco et Melox) et chaque installation a sa propre autorisation de rejets.

Les rejets liquides et atmosphériques sont présentés dans le tableau 1. Historiquement dominés par les rejets des installations de l'INBS, les rejets de tritium gazeux ont fortement diminué depuis l'arrêt des réacteurs Célestin et de l'Atelier Tritium en 2012, après une première diminution importante entre 1997 et 1998 avec l'arrêt d'UP1, comme le montre la figure 2.

Le CEA de Marcoule et l'IRSN ont mis en place depuis l'ouverture du site des plans de surveillance couvrant tous les compartiments de l'environnement. Le CEA met en œuvre ce plan pour le compte de l'ensemble des exploitants du site de Marcoule. Les plans de surveillance correspondants sont présentés sur le tableau 2 et la figure 1.

Influence du centre de Marcoule sur son environnement

Le tritium

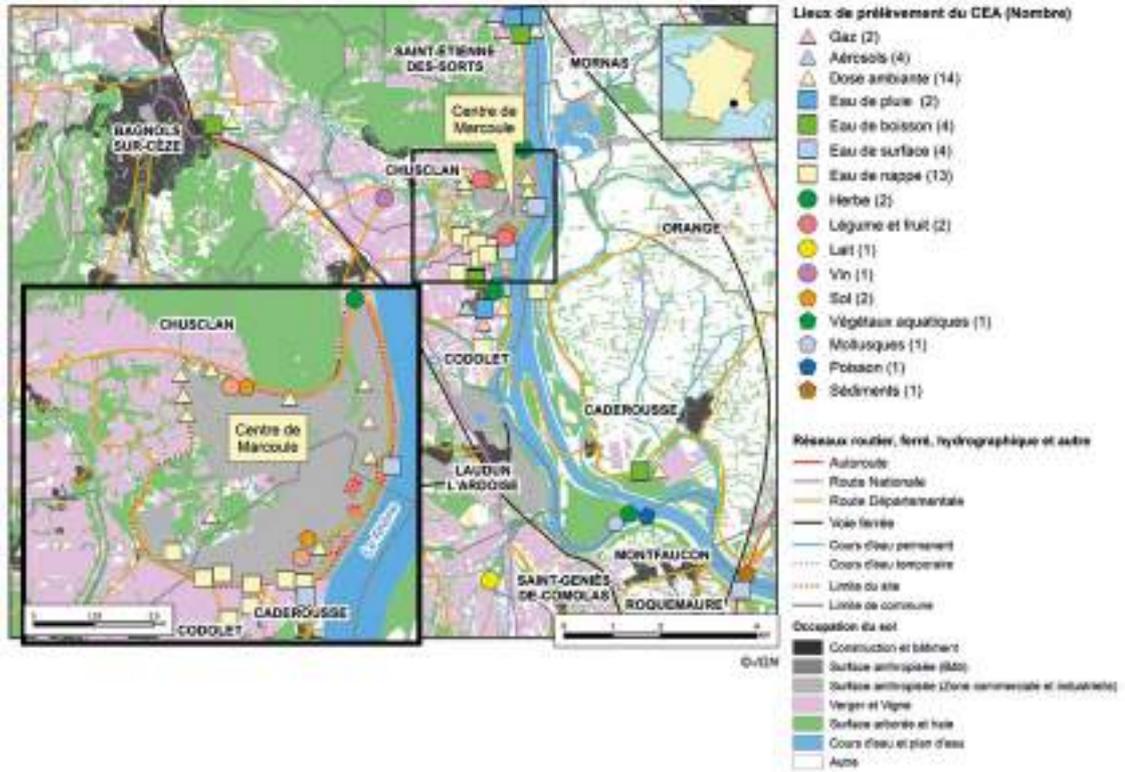
Le tritium, radionucléide prépondérant dans les rejets atmosphériques et liquides de Marcoule, est aussi le plus mesuré et le plus abondant dans les différentes composantes de l'environnement autour du site.

Dans l'air, le tritium est présent sous deux formes : vapeur d'eau tritiée (HTO) et gaz (HT et autres composés organiques gazeux tritiés). Les activités dans l'air, pour ces 2 formes, sont mesurées dans des prélèvements effectués à l'aide de barboteurs à une fréquence hebdomadaire sur 2 stations : Saint-Étienne-des-Sorts au nord et Codolet au sud du site. La figure 3 présente les résultats acquis sur ces deux stations.

Comme lors de la période précédente (2018-2020), la forme HTO est prépondérante. Néanmoins, 93 % des résultats de HTO acquis sur les deux stations sont inférieurs aux seuils de décision ($\approx 0,2 \text{ Bq/m}^3$). À Codolet, les activités sur la période 2021-2023 varient de moins de $0,1 \text{ Bq/m}^3$ à $0,22 \text{ Bq/m}^3$ pour le HTO et de $0,18 \text{ Bq/m}^3$ à $0,44 \text{ Bq/m}^3$ pour le HT. Sur la station de Saint-Étienne-des-Sorts, les activités sont du même ordre de grandeur : de $0,16 \text{ Bq/m}^3$ à $0,69 \text{ Bq/m}^3$ pour le HTO et de $0,16 \text{ Bq/m}^3$ à $0,72 \text{ Bq/m}^3$ pour le HT. De manière générale, cette gamme d'activités est du même ordre de grandeur que celle qui était observée sur la période précédente (2018-2020) et nettement plus faible que celle des antérieures en raison de la mise à l'arrêt de l'Atelier Tritium en 2012.

FIGURE 1 / LOCALISATION DES POINTS DE SURVEILLANCE CEA (1A) ET IRSN (1B) AUTOUR DU SITE DE MARCOULE

1A



1B

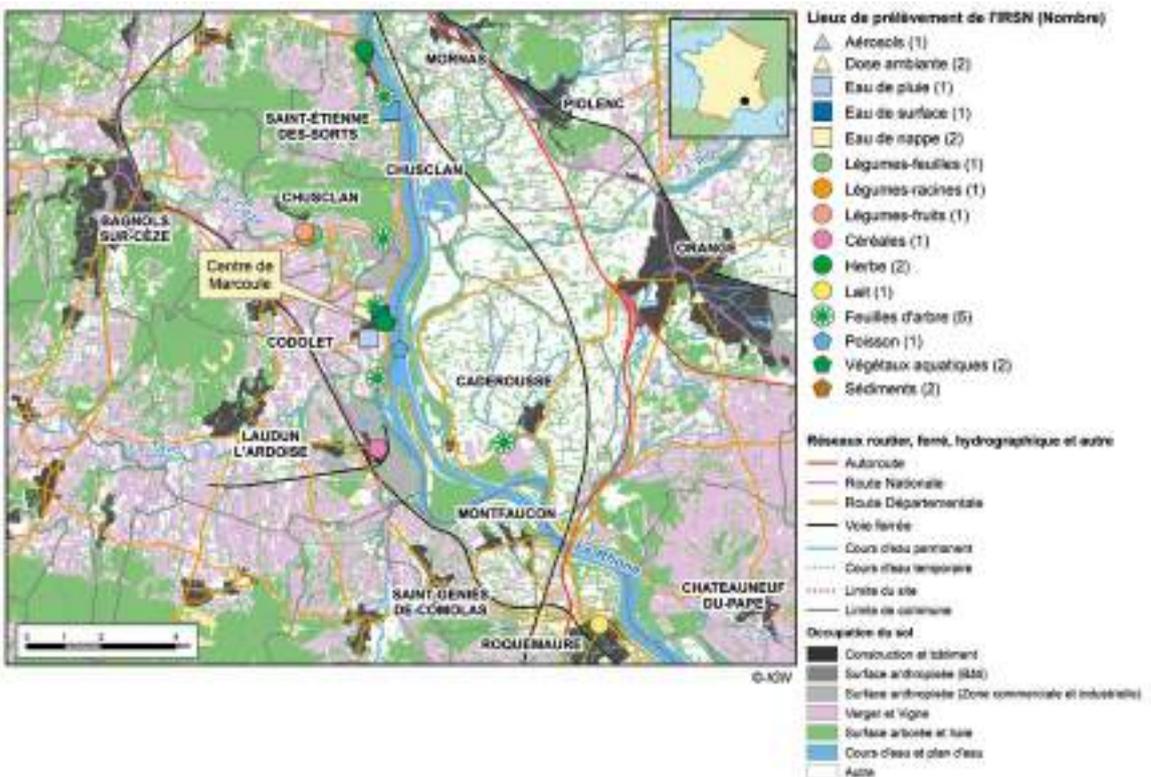


TABLEAU 1 / RÉPARTITION DES REJETS ENTRE 2017 ET 2022 ENTRE LES DIFFÉRENTES INSTALLATIONS

Effluents atmosphériques des INB du CEA Marcoule (Phénix et Atalante)	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Aérosols bêta gamma (MBq)	9,5	9,6	11,1	9,2	8,1	6,8
Aérosols alpha (MBq)	0,15	0,19	0,29	0,23	0,29	0,17
Tritium (GBq)	28,9	38,8	24,6	23,2	19,2	13,0
Halogènes (MBq)	14,3	19,1	19,1	4,2	4,0	3,3
Gaz hors tritium (TBq)	50,9	49	46,7	43,9	24,7	7,9
Carbone-14 (GBq)	0,25	0,08	0,17	0,07	0,12	0,18

Effluents atmosphériques tritiés de l'INBS (TBq)	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	24	20	27	14,2	12,1	19,5

Effluents liquides (INBS)*	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Émetteurs alpha (GBq)	2,77	2,02	1,20	1,33	1,51	0,9
Carbone-14 (GBq)	1,96	1,53	1,16	1,59	1,33	1,93
Iodes (GBq)	0,39	0,28	0,44	0,39	0,34	0,24
Tritium (TBq)	2,32	0,68	1,55	0,67	0,26	2,32
Autres émetteurs bêta gamma (GBq)	113	52,5	38,3	27,1	26,2	18

* Les effluents liquides générés par les installations de la plateforme de Marcoule, à l'exception de CENTRACO, sont traités dans une installation de l'INBS (STEL).

FIGURE 2 / ÉVOLUTION DES REJETS TRITIÉS ATMOSPHÉRIQUES DEPUIS 1996 (TBq/an)

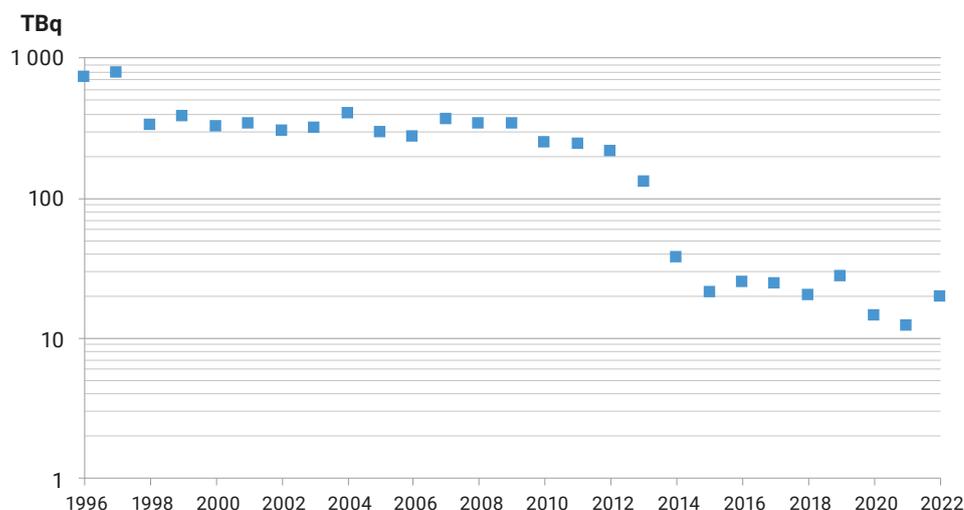
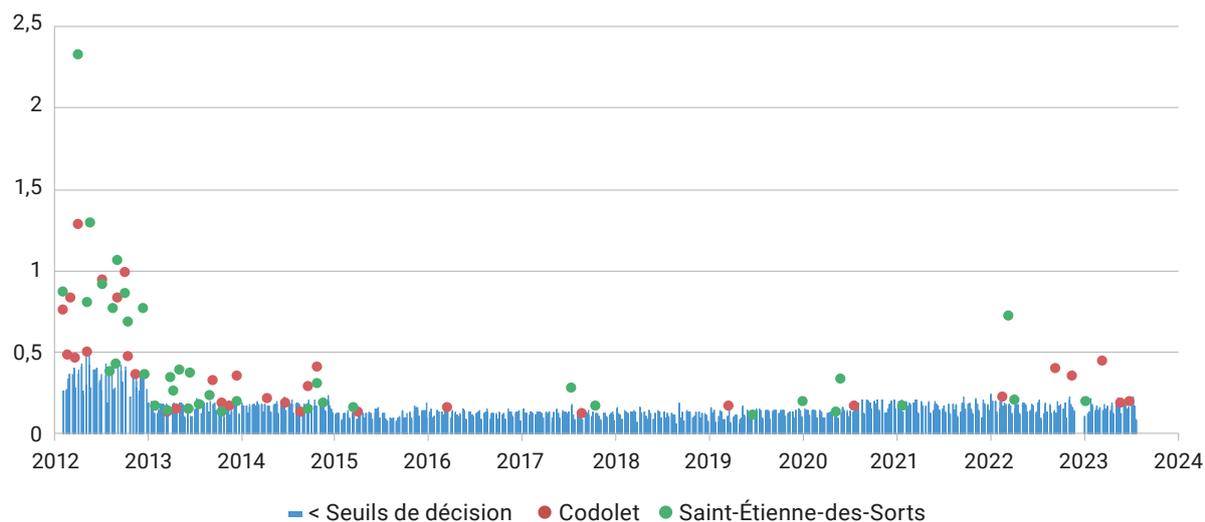


TABLEAU 2 / PLANS DE SURVEILLANCE CEA ET IRSN DU SITE DE MARCOULE

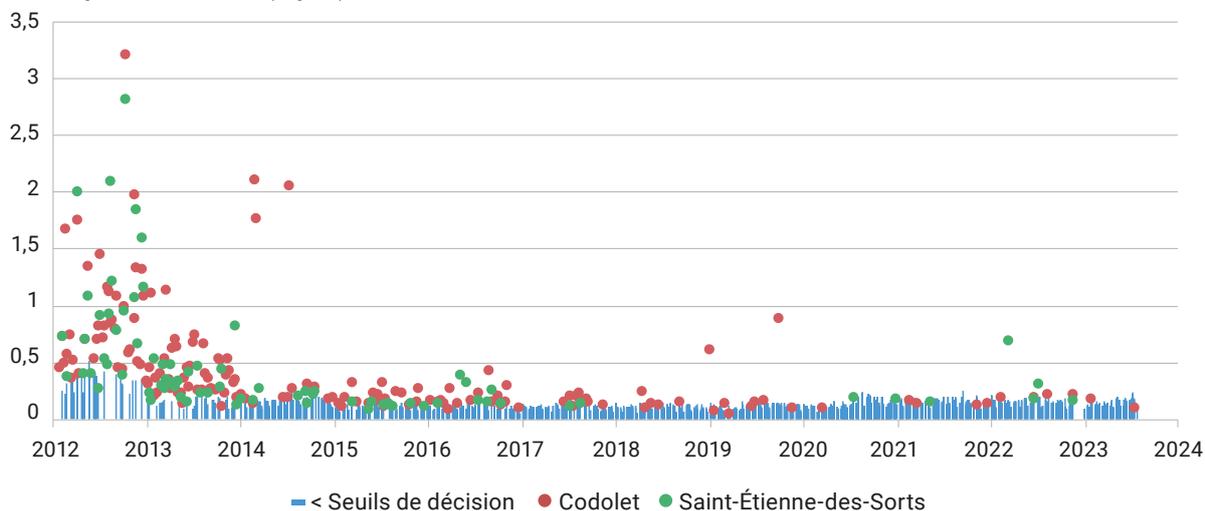
Milieu surveillé ou nature du contrôle	CEA	IRSN
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> 4 balises dans l'environnement à St-Étienne-des-Sorts, Bagnols-sur-Cèze, Codolet et Caderousse : débit de dose γ ambiant 10 dosimètres passifs à la clôture du site 	<ul style="list-style-type: none"> 2 balises dans l'environnement à Bagnols-sur-Cèze et Orange : débit de dose γ ambiant
Aérosols atmo-sphériques	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement à St-Étienne-des-Sorts, Bagnols-sur-Cèze, Codolet et Caderousse : activités α et β globales (quotidien), spectrométrie γ, si α et β globaux > 2 mBq/m³ et spectrométries α et γ sur regroupement mensuel des filtres quotidiens 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement à Codolet : spectrométrie γ (hebdomadaire) et spectrométrie α (mensuelle)
Tritium, carbone-14 et iode-129 dans l'air	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement à St-Étienne-des-Sorts et Codolet : tritium dans l'air HTO - HT, ¹²⁹I et ¹⁴C (4 périodes par mois suivant planning annuel) 	
Eau de pluie	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement à Codolet et Saint-Étienne-des-Sorts : activités α et β globales, tritium (bimensuel) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement à Codolet : spectrométrie γ et tritium (mensuelles)
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> 6 points de prélèvement en clôture du site : activités α et β globales, tritium (mensuel ou trimestriel) 7 points de prélèvement dans la plaine de Codolet : activités α et β globales, tritium (mensuel ou trimestriel) et ⁹⁰Sr (annuel sur 1 point) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement à Codolet : spectrométrie γ, tritium, uranium isotopique, spectrométrie α et ⁹⁰Sr (semestrielles)
Eau de surface	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement dans le Rhône en amont et en aval du site : activités α et β globales sur filtrat, activité β globale sur résidu de filtration, tritium (hebdomadaires) spectrométrie γ sur le point aval (mensuelle) 1 point de prélèvement dans le contre-canal en aval du site : activités α et β globales, tritium (mensuelles) 1 point de prélèvement dans l'Étang de Codolet : activités α et β globales, tritium, spectrométrie α (mensuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement dans l'étang de Codolet : spectrométrie γ, tritium et ⁹⁰Sr (semestrielles)
Sédiments	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement en aval du site : spectrométrie γ et spectrométrie α (annuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement en amont et en aval du site : spectrométrie γ, spectrométrie α, ⁹⁰Sr (semestrielles)
Poissons	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement en aval du site : spectrométrie γ, TOL et ¹⁴C (semestrielles) et HTO (annuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement en aval du site : spectrométrie γ, spectrométrie α, ⁹⁰Sr (annuelles)
Mollusques	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement en aval du site : spectrométrie γ, HTO, TOL et ¹⁴C (annuelles) 	
Végétaux aquatiques	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement en aval du site : spectrométrie γ, ¹⁴C et HTO (annuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement en amont et en aval du site : spectrométrie γ, TOL, spectrométrie α et ⁹⁰Sr (semestrielles)
Sols	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement au nord et au sud du site : spectrométrie γ (annuelle) 	
Herbe	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement au nord et au sud du site : spectrométrie γ et spectrométrie α (mensuelles), ¹⁴C (trimestrielles), HTO et TOL (semestrielles) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement à St-Étienne-des-Sorts et Codolet : spectrométrie γ, HTO et TOL, spectrométrie α, ⁹⁰Sr (annuelles)
Feuilles d'arbre		<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvement à St-Étienne-des-Sorts, Codolet et Caderousse : HTO et TOL (annuelles) 2 points situés à 1 km au nord et au sud du site : TOL, ¹⁴C
Légumes et fruits	<ul style="list-style-type: none"> Campagne annuelle sur les principales productions notamment au nord et au sud du site : spectrométrie γ, ⁹⁰Sr, ¹⁴C (annuelle), HTO et TOL (annuelles sur 1 fruit et 1 légume) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement de légume feuille au sud-ouest du site : spectrométrie γ, HTO et TOL (annuelles) 1 point de prélèvement de légume racine au sud-est du site : spectrométrie γ, spectrométrie α (annuelles) 1 point de prélèvement au sud-est du site : spectrométrie γ, HTO et TOL (annuelles)
Blé		<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement au sud du site : spectrométrie γ, TOL, ⁹⁰Sr (annuelles)
Vin	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement : spectrométrie γ, ⁹⁰Sr, ¹⁴C (annuelles) 	
Lait	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement à Saint Laurent des arbres : spectrométrie γ (mensuelle), ¹⁴C (trimestrielle), HTO, TOL (semestrielle) et ⁹⁰Sr (annuelle) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement au sud du site : spectrométrie γ, HTO, ¹²⁹I et ⁹⁰Sr (semestrielles)
Eau potable	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement à Caderousse, Codolet, St-Étienne-des-Sorts et Bagnols-sur-Cèze : activité β globale, tritium et spectrométrie α (annuelles) 	

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS L'AIR SOUS FORME DE VAPEUR D'EAU (HTO) ET SOUS FORME DE GAZ (HT et autres composés organiques gazeux tritiés) MESURÉES À FRÉQUENCE HEBDOMADAIRE DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE MARCOULE

HT : tritium gazeux (Bq/m³)



HTO : vapeur d'eau tritiée (Bq/m³)



Toutefois, les activités significatives et les seuils de décision de tritium de l'air aux alentours de Marcoule restent nettement au-dessus du bruit de fond de ce radionucléide qui se situe autour de 0,01 Bq/m³ pour le tritium sous forme HTO.

De manière cohérente avec l'activité de tritium de l'air et avec la baisse des rejets, la gamme des activités de tritium dans l'eau de pluie est relativement stable depuis 2013. À Codolet, sur la période 2021-2023, les activités mesurées par l'IRSN et le CEA sont comprises entre 1,9 et 88 Bq/L mesurée en février 2021, en lien avec les activités de démantèlement se déroulant sur le site (figure 4). À Saint-Étienne-des-Sorts, les activités mesurées par le CEA sont comprises entre

5,3 et 12,5 Bq/L. Ces activités sont à comparer avec le bruit de fond actuel compris entre moins de 0,3 et 1,8 Bq/L d'eau de pluie.

Les activités atmosphériques présentées précédemment sont à l'origine de celles mesurées dans l'herbe et les feuilles d'arbres prélevées autour du site. L'activité de tritium libre (HTO) dans l'herbe est le reflet de la concentration de tritium présent dans l'air quelques heures avant le prélèvement, celle de tritium organiquement lié (TOL) est le reflet de la concentration moyenne dans l'air lors la croissance du végétal. Pour la période concernée les activités de HTO dans l'herbe varient de 6,7 Bq/kg frais à 11,2 Bq/kg frais (figure 5).

FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS LES EAUX DE PLUIE PRÉLEVÉES À CODOLET PAR LE CEA ET L'IRSN (Bq/L)

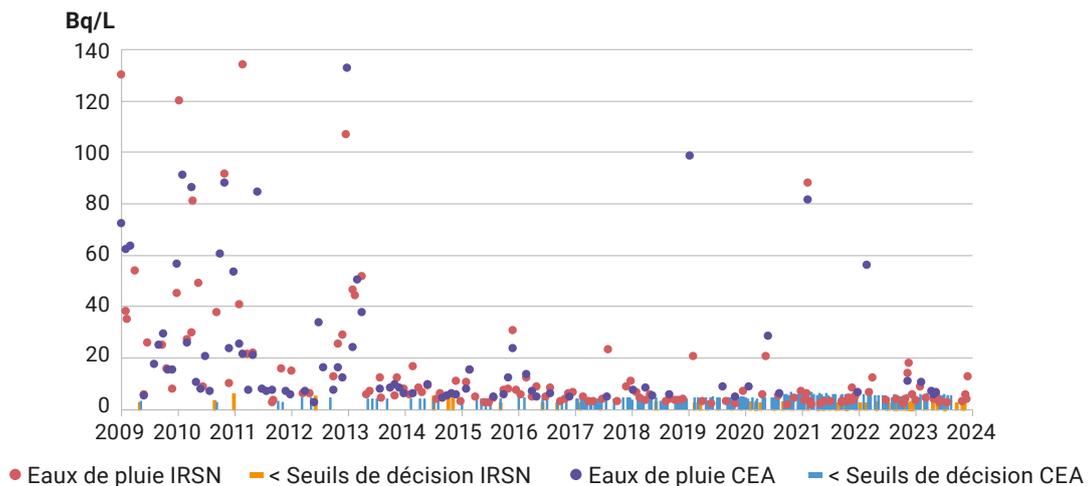
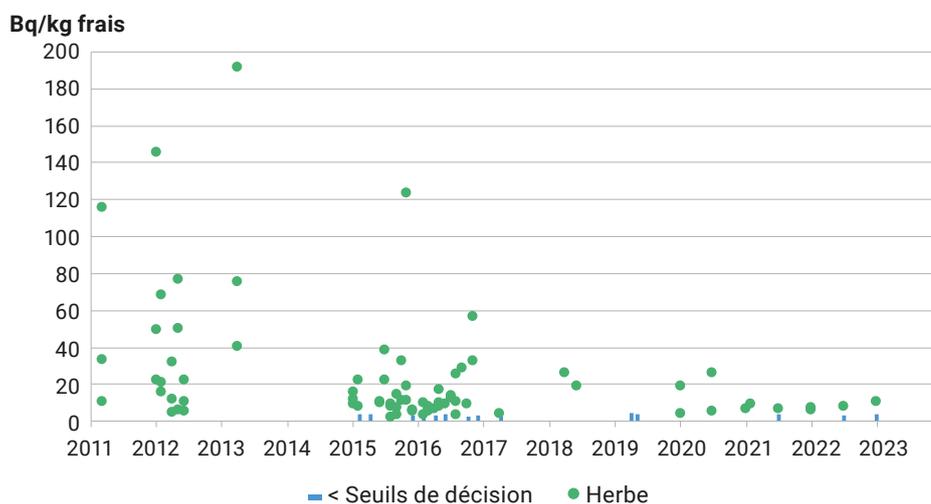


FIGURE 5 / ACTIVITÉS DE TRITIUM LIBRE DANS L'HERBE (Bq/kg frais) À PROXIMITÉ DU CEA DE MARCOULE



La figure 6 présente les activités de TOL (en Bq/L d'eau de combustion) dans les feuilles d'arbres prélevées par l'IRSN dans le cadre de la surveillance du CEA Marcoule. Les activités de tritium dans les feuilles d'arbres à proximité nord et sud du site de Marcoule sont généralement plus élevées au sud du site quelle que soit la période de prélèvement en lien avec l'orientation des vents dominants. Même si les activités ont diminué depuis ces dix dernières années, elles restent nettement supérieures aux activités mesurées en dehors d'activité nucléaire (de l'ordre de 1 Bq/L).

En revanche, la figure 7 montre que, malgré un abaissement des seuils de décisions de 2 à 0,8 Bq/L sur la période 2021-2023, les activités de tritium dans le lait restent quasi toutes inférieures aux seuils de décision. Seule une activité de 1,5 Bq/L est mesurée significativement en octobre 2023, cette activité se situe dans la gamme des seuils de décision des années précédentes. Compte tenu des activités dans les végétaux, les activités dans le lait restent faibles. Il est donc probable que la part des fourrages d'origine très locale dans l'alimentation des animaux soit faible.

FIGURE 6 / ACTIVITÉS DE TOL DANS LES FEUILLES D'ARBRES PRÉLEVÉES PAR L'IRSN DANS LE CADRE DE LA SURVEILLANCE DU SITE DE MARCOULE (Bq/L d'eau de combustion)

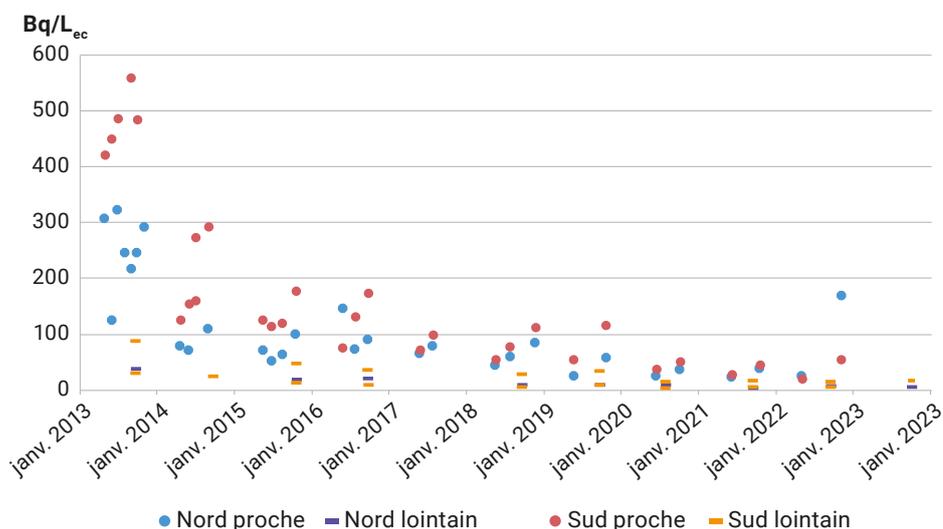
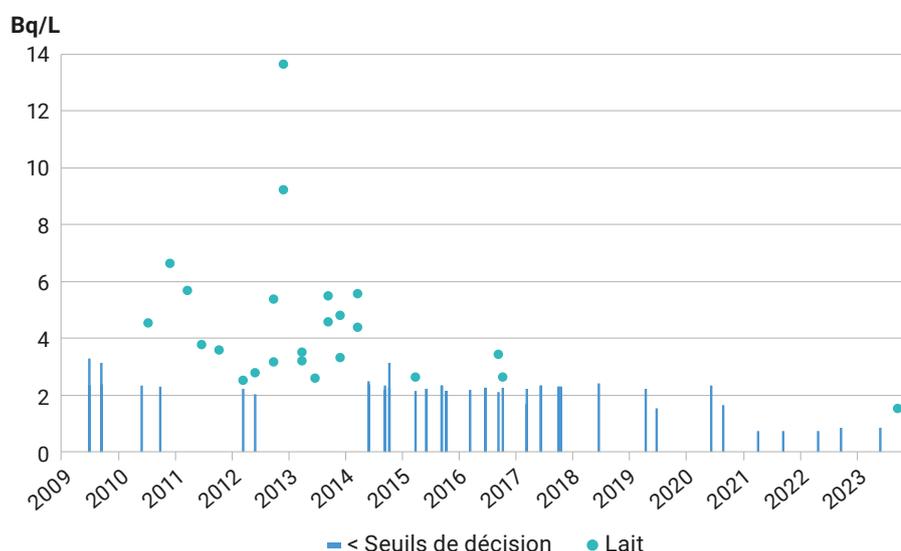


FIGURE 7 / ACTIVITÉS DE TRITIUM LIBRE DANS LE LAIT À PROXIMITÉ DU SITE DU CEA DE MARCOULE (Bq/L)



Pour la période 2021-2023, les activités de tritium libre dans les fruits sont quasiment toutes inférieures aux seuils de décision de 5,2 Bq/kg frais (figure 8). Seule une valeur significative a été relevée dans un fruit prélevé à Codolet, donc sous les vents dominants, en janvier 2021 à hauteur de 5,8 Bq/kg frais. Néanmoins cette activité, associée à une très forte incertitude (5,4 Bq/kg frais) est très proche des seuils de décision et reste cohérente avec les activités dans les feuilles d'arbres. En ce qui concerne le vin, deux prélèvements ont été effectués en 2021 et 2022 avec des activités de tritium libre respectives de 17,8 et 9,2 Bq/L.

L'influence des rejets passés de tritium du site est encore visible dans les eaux des nappes phréatiques, même si la diminution amorcée dès 2012 s'est poursuivie lors des trois dernières années dans les eaux souterraines prélevées sur l'ensemble des piézomètres du site (figure 9). Sur la période 2021-2023, les activités les plus élevées ont été observées en mai 2021 sur le piézomètre F215 sur le site avec une valeur de 22,5 Bq/L et en septembre 2022 en dehors du site, sur le piézomètre P53, avec une valeur de 18,2 Bq/L.

La surveillance radiologique des eaux de surface permet d'observer également un marquage de tritium, notamment à l'étang de Codolet situé au sud du site. L'évolution de l'activité de tritium dans l'étang de Codolet présentée dans la figure 10 suit celle des eaux de nappes (figure 9). La moyenne de cette activité de tritium est passée de 10,1 Bq/L sur la période 2018-2020 à 8,99 Bq/L sur la période 2021-2023.

Les analyses effectuées régulièrement dans les eaux du Rhône mettent en évidence l'influence des autres installations nucléaires présentes dans la vallée du Rhône en amont du site de Marcoule (les rejets des CNPE totalisent environ 95 % des rejets de tritium) (figure 11). L'activité de tritium à l'aval du site est en moyenne de 6,5 Bq/L sur la période 2021-2023 pour une gamme allant de 1,8 Bq/L à 14,9 Bq/L, en cohérence avec la période précédente (2018-2020).

Concernant l'alimentation en eau potable (AEP), contrairement à la période précédente (2018-2020), le tritium n'a pas été détecté de manière significative entre 2021 et 2023. Tous les résultats de mesure sont inférieurs au seuil de décision de 6,6 Bq/L.

FIGURE 8 / ACTIVITÉS DE TRITIUM LIBRE DANS LES ÉCHANTILLONS DE FRUITS PRÉLEVÉS À PROXIMITÉ DU SITE DU CEA DE MARCOULE (Bq/kg frais)

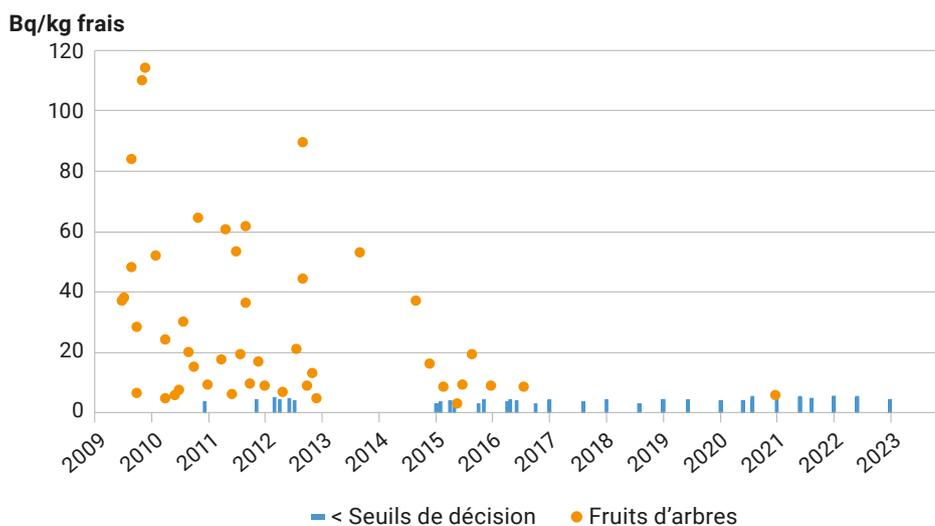


FIGURE 9 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS LES EAUX DE NAPPE PHRÉATIQUE (Bq/L) PRÉLEVÉES SUR LE SITE (graphique du haut) ET AU SUD DU SITE (graphique du bas)

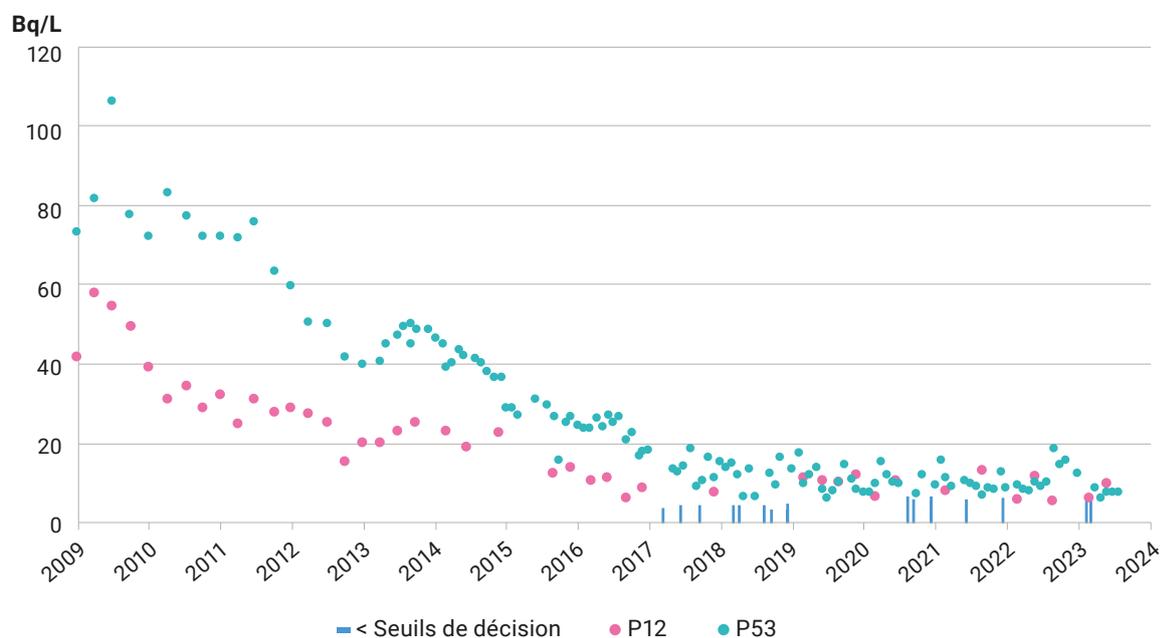
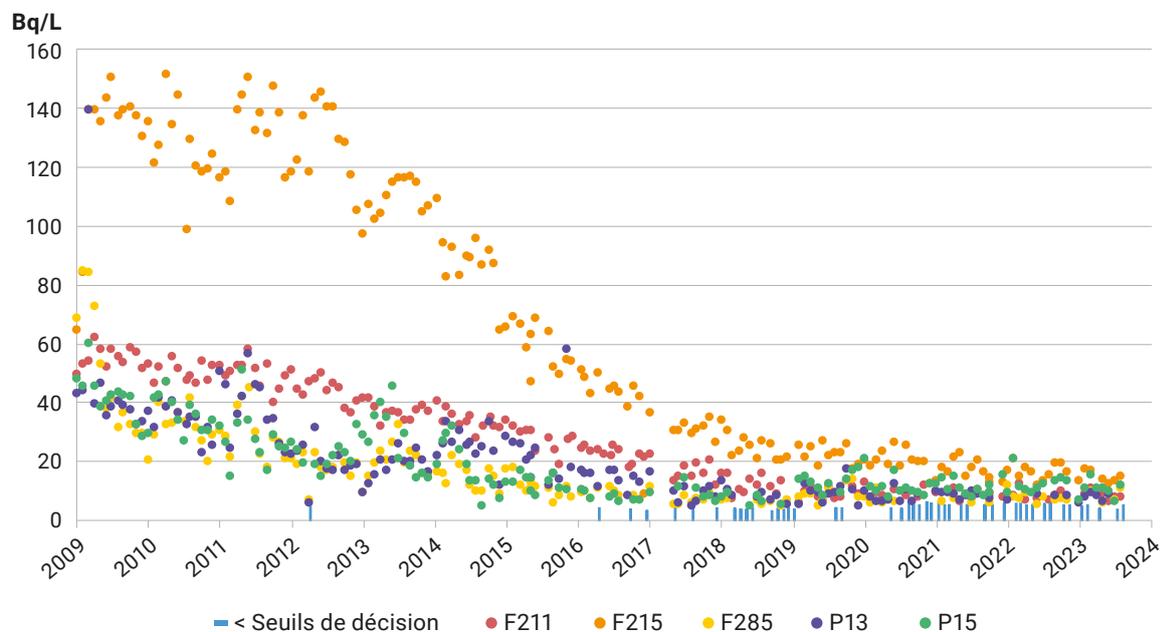


FIGURE 10 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS L'EAU PRÉLEVÉE DANS L'ÉTANG DE CODOLET, AU SUD DU SITE DU CEA DE MARCOULE (Bq/L)

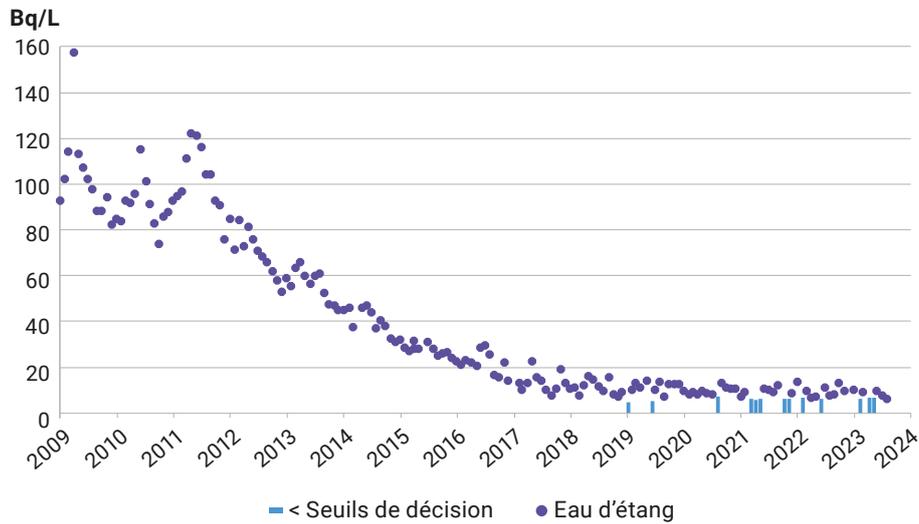
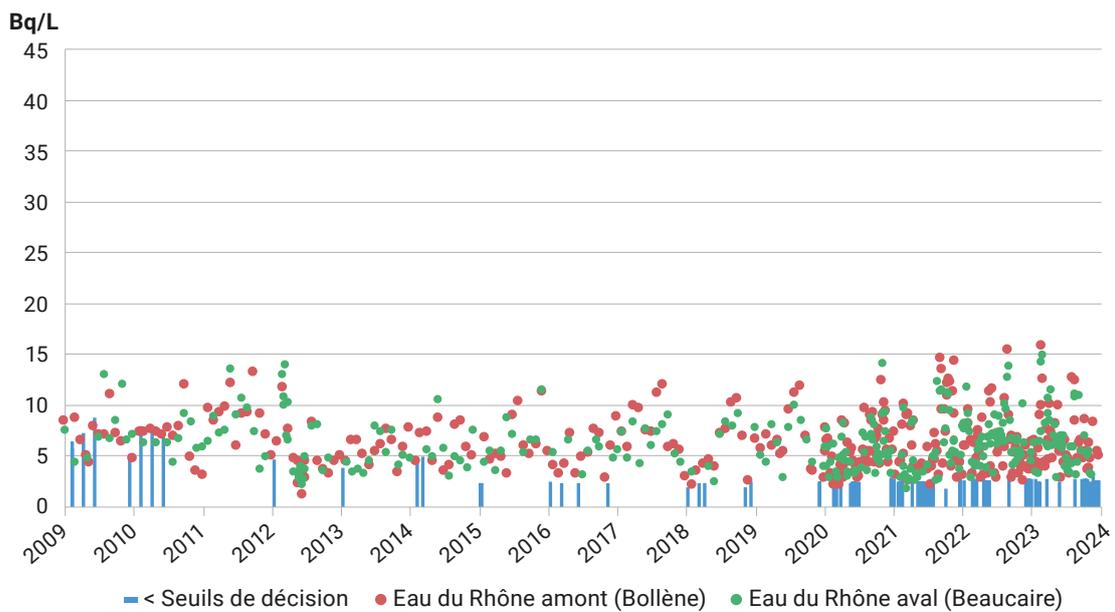


FIGURE 11 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS L'EAU DU RHÔNE PRÉLEVÉES EN AMONT (commune de Bollène) ET EN AVAL (commune de Beaucaire) DU SITE DE MARCOULE (Bq/L)



Le carbone-14

Bien que les rejets atmosphériques de carbone-14 émis par les installations de Marcoule soient très faibles, il en résulte des activités dans l'environnement qu'il est possible de distinguer du bruit de fond par la mesure de l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone (Bq/kg de carbone). La figure 12 présente les activités mesurées par l'IRSN depuis 2009 dans différents végétaux et notamment des feuilles d'arbres. La plupart de ces activités sont supérieures à la gamme du bruit de fond dont la valeur moyenne est pour la période 2021-2023 de 222 Bq/kg de C. La moyenne des résultats acquis par l'IRSN sur la période 2021-2023 témoigne d'une augmentation de + 12 Bq/kg de C, soit + 5,4 % du bruit de fond actuel, due aux rejets du site. Cette activité spécifique est assez élevée au regard des faibles rejets gazeux de carbone-14 du site ; il est probable que les points de prélèvement soient dans une zone particulièrement exposée aux rejets. À cette activité ajoutée exprimée par unité de masse de carbone, correspond une activité massique ajoutée de l'ordre de 0,36 Bq/kg frais pour une salade, 1,08 Bq/kg frais pour des fruits et 0,84 Bq/L pour du lait. Ces valeurs sont cohérentes avec les résultats de mesure du CEA de Marcoule dans les denrées alimentaires.

Le carbone-14 dans le milieu aquatique et notamment dans les poissons du Rhône en aval de Marcoule, résulte principalement des rejets des CNPE Rhodaniennes (chapitre relatif au CNPE).

Les autres radionucléides

En milieu terrestre, seul le césium-137 hérité des retombées de l'accident de Tchernobyl et des essais nucléaires, est mesurable à des niveaux similaires à ceux observés en dehors de l'influence d'une installation nucléaire et qui relèvent donc du bruit de fond radiologique (chapitre 1).

De manière générale, les analyses effectuées sur des échantillons prélevés dans le Rhône témoignent d'une relative stabilité des niveaux depuis 2009. Les graphiques de la figure 13 montrent cette stabilité tant à l'amont (graphique du haut) qu'à l'aval (graphique du bas). Comme précédemment, les activités de césium-137 dans les sédiments prélevés dans le Rhône en aval du site (de 3,46 à 10,8 Bq/kg sec) sont plus élevées que celles des sédiments prélevés en amont (de 0,41 et 1,28 Bq/kg sec) pour la période 2021-2023. On observe que les sédiments sont légèrement plus marqués à Codolet. Néanmoins, les activités correspondent à la gamme d'activités du bruit de fond radiologique. D'autres radionucléides artificiels sont mesurés dans des plantes aquatiques prélevées dans le Rhône en amont comme en aval du site : cobalt-60, strontium-90, américium-241 et plutonium-239+240 (tableau 3). Il apparaît que les activités de ces radionucléides ne sont pas significativement différentes entre l'amont et l'aval. Enfin, les activités des poissons prélevés en 2021 et 2022 en aval du site présentent des traces quantifiées de césium-137 et de strontium-90 dans la gamme des valeurs mesurées habituellement dans le Rhône.

FIGURE 12 / ACTIVITÉS DE CARBONE-14 MESURÉES PAR L'IRSN DANS L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE DU CEA DE MARCOULE (Bq/kg de carbone)

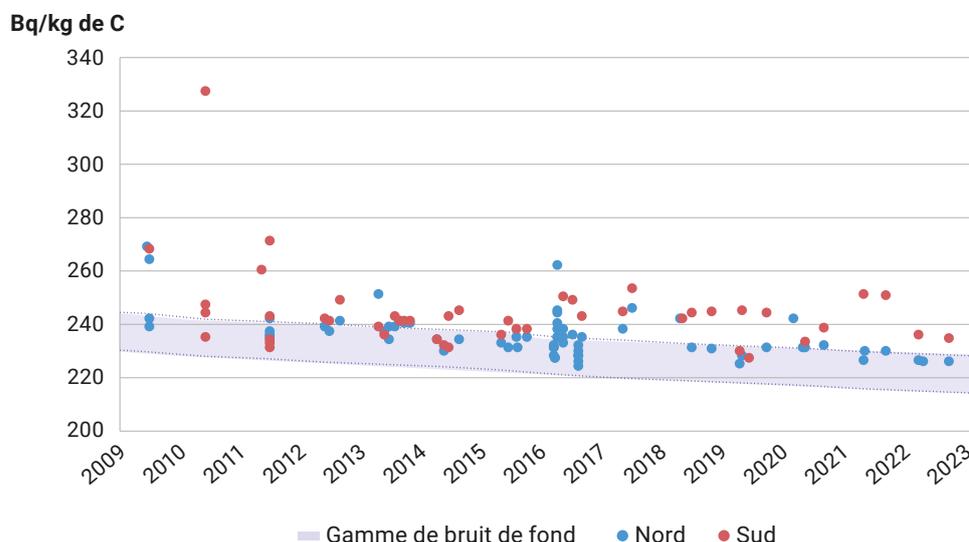
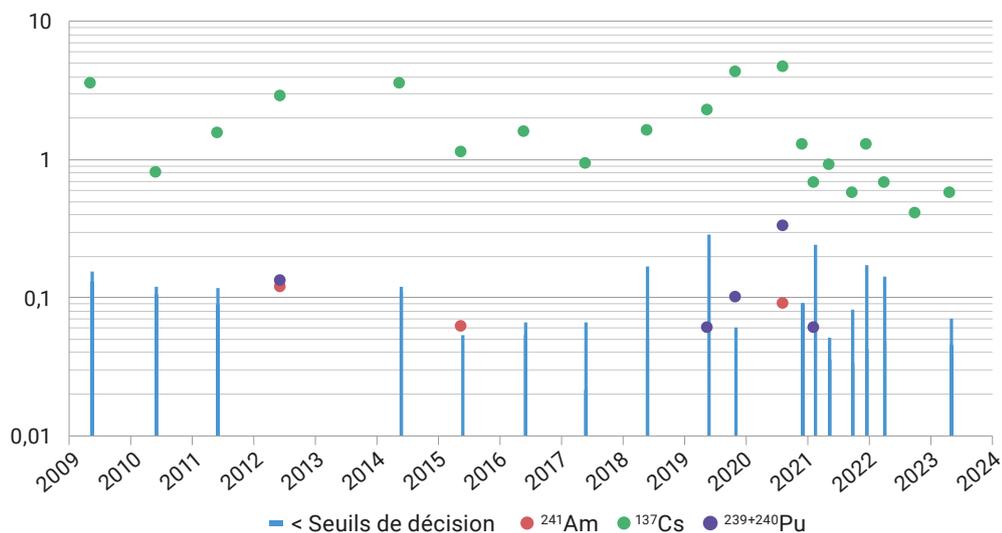


FIGURE 13 / ACTIVITÉS MASSIQUES DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES D'INTÉRÊT PRÉSENTS DANS LES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS DANS LE RHÔNE EN AMONT (13A) ET EN AVAL (13B) DU CEA DE MARCOULE (Bq/kg sec)

13A - Amont Bq/kg sec



13B - Aval Bq/kg sec

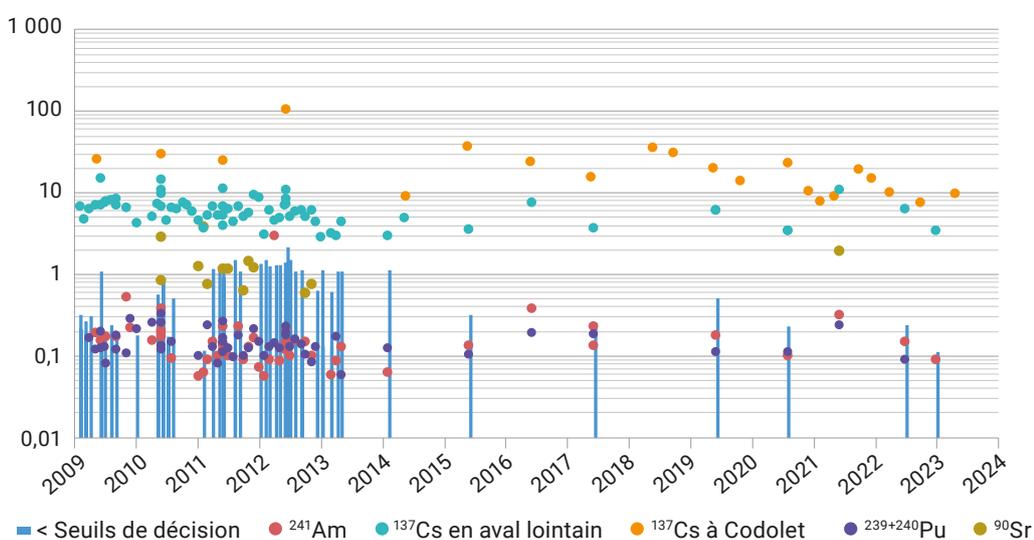


TABLEAU 3 / ACTIVITÉS DANS LES PLANTES AQUATIQUES PRÉLEVÉES PAR L'IRSN EN AMONT ET EN AVAL DU CEA DE MARCOULE (Bq/kg sec)

Radionucléide	Valeur min. et max. en amont Saint-Étienne-des-Sorts	Valeur min. et max. en aval Codolet
^3H	1,23 - 7,3	2,00 - 4,67
^{137}Cs	< SD - 1,23	1,84 - 2,8
^{60}Co	< SD - 1,00	< SD
^{90}Sr	< SD - 1,53	0,82 - 2,3
^{241}Am	< SD - 0,019	< SD - 0,18
^{238}Pu	< SD - 0,008	< SD - 0,009
$^{239+240}\text{Pu}$	< SD - 0,032	0,049 - 0,27

Conclusion et évaluations dosimétriques

La diminution des activités de tritium de toutes les composantes de l'environnement de Marcoule, qui résulte de la diminution très importante des rejets en lien avec l'arrêt des réacteurs Célestin (en 2009) puis de l'Atelier Tritium (en 2012), caractérise l'évolution radiologique de l'environnement autour du site au cours de ces dernières années. Cette diminution fait que sur la période 2021-2023, le nombre de mesures significatives (supérieures aux seuils de décision) est beaucoup plus faible qu'auparavant ; ainsi, les activités de tritium libre dans l'air supérieures aux seuils de décision métrologiques ne représentent plus que 7 % des analyses, ce qui ne permet plus l'obtention d'une moyenne et donc d'estimer la dose par inhalation et passage transcutané correspondante. En revanche, la dose par incorporation de tritium par ingestion de denrées produites localement est estimée à $0,04 \mu\text{Sv}/\text{an}$.

Sur la base des activités spécifiques du carbone-14 effectuées par l'IRSN autour du site et des scénarios d'expositions fournis dans le chapitre 5 d'annexes, la dose ajoutée due au carbone-14 serait de l'ordre de $0,07 \mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette valeur est également proche de celle estimée pour la période précédente ($0,06 \mu\text{Sv}/\text{an}$). Basée sur un nombre restreint de résultats de mesures acquis sur des échantillons prélevés dans une zone particulièrement exposée aux rejets du site, elle est certainement majorante des doses dues au carbone-14 effectivement reçues par la population des environs immédiats de Marcoule.

Les rejets des autres radionucléides sont trop faibles pour que les activités environnementales qui en résultent puissent être quantifiées.



Vue aérienne du site de Marcoule

Le site de Saclay

Le site de Saclay, rattaché depuis le 1^{er} février 2017 avec le site de Fontenay-aux-Roses au centre CEA Paris-Saclay, est situé dans le département de l'Essonne à une vingtaine de kilomètres de Paris (figure 1). Il occupe une surface de 125 ha sur lesquels sont implantées au 31 décembre 2023, sept installations nucléaires de base (INB), toutes rattachées à la Direction des énergies (DES) du CEA. En effet, le réacteur Ulysse (INB 18, réacteur de faible puissance) mis en service en 1961 pour l'enseignement et la formation, arrêté définitivement en février 2007 et dont les travaux de démantèlement se sont achevés en décembre 2019 dans le respect de l'échéance du décret n° 2014-906 du 18 août 2014, a été déclassé le 25 juillet 2022.

Parmi les sept INB du CEA, seules trois sont encore en exploitation :

- le laboratoire d'étude des combustibles irradiés (LECI-INB 50) ;
- l'irradiateur gamma Poséidon (INB 77) ;
- la zone de gestion des effluents radioactifs liquides (INB 35).

Les quatre autres INB du CEA, sont définitivement arrêtées :

- les Laboratoires de haute activité ou LHA (INB 49) qui avaient pour mission de mettre à disposition des unités utilisatrices du CEA des locaux pour l'implantation d'expérimentations à caractère radioactif ; cette installation qui est aujourd'hui au stade de démantèlement dans le cadre du décret du 18 septembre 2008 se compose de cellules en majorité vides et est en cours d'assainissement ;
- le réacteur expérimental Osiris (INB 40) qui a fonctionné durant 50 ans pour l'irradiation de matériaux et de combustibles sous flux de neutrons afin d'étudier leur comportement dans les centrales nucléaires a été mis à l'arrêt définitif en décembre 2015 ; sa maquette critique, le réacteur Isis, a quant à lui fonctionné jusqu'en mars 2019 pour mener des activités de formation des opérateurs et de qualification d'équipements ;
- le réacteur Orphée (INB 101), en service depuis 1980 et dédié à la production de faisceaux de neutrons pour la recherche scientifique, a été mis à l'arrêt définitif le 29 octobre 2019 ;

- la zone de gestion des déchets radioactifs solides (INB 72) mise en service en 1971 qui assurait le traitement, le conditionnement et l'entreposage des déchets solides de haute, moyenne et faible activité des installations du site de Saclay, ainsi que l'entreposage de matières et de déchets anciens en attente d'évacuation, est aujourd'hui au stade de démantèlement dans le cadre du décret du 2 août 2022.

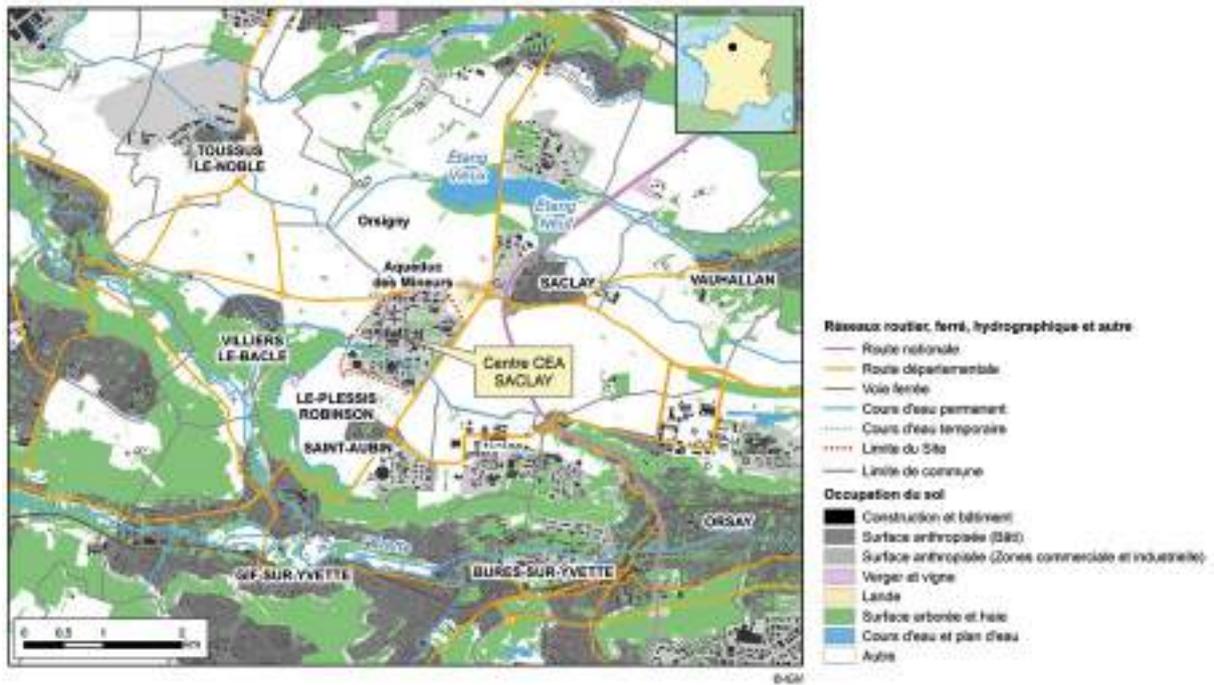
À noter également la présence sur le site de Saclay de plusieurs installations réglementées au titre du code de l'environnement (ICPE) et/ou au titre du code de la santé publique. Il s'agit d'une part d'installations de R&D appartenant à trois directions du CEA (DES, Direction de la recherche fondamentale [DRF] et Direction de la recherche technologique [DRT]) qui œuvrent dans les différents thèmes de recherche du CEA que sont les énergies bas carbone, le climat et l'environnement, la santé, l'exploration de la matière et les nouvelles technologies. D'autre part, il s'agit d'installations de service avec entre autres les stations de traitement d'effluents du site : sanitaires, industriels, de production d'eau recyclée.

Enfin, l'entreprise Curium/CIS-Bio international (INB 29) qui fabrique des produits utilisés en médecine nucléaire, est également implantée sur le site de Saclay.

Les rejets d'effluents liquides et atmosphériques du site

Les effluents radioactifs liquides issus des activités industrielles et de R&D des installations sont collectés dans des cuves puis transférés vers la filière nucléaire appropriée qui peut impliquer un traitement au niveau de l'INB 35 du site. Suivant leur origine, les autres effluents liquides issus des installations (hors sanitaire) peuvent être rejetés directement à l'environnement ou transférés *via* le réseau des effluents industriels à la station de traitement dédiée à ces effluents. Les installations ne peuvent rejeter leur effluent dans le réseau des effluents industriels qu'après autorisation, à la suite de la vérification de leur conformité avec la réglementation en vigueur (activités volumiques, activité totale rejetée, concentrations physico-chimiques de l'effluent) réalisée au niveau de cuves tampons. Après traitement par la station dédiée, ces effluents liquides sont, soit transférés à la station de production d'eau recyclée, soit rejetés dans l'environnement. Les rejets liquides du site débouchent *via* l'aqueduc des Mineurs dans l'étang Vieux puis dans l'étang Neuf de Saclay qui se déverse ensuite dans le ruisseau de Vauhallaan, un affluent de la Bièvre (figure 1).

FIGURE 1 / IMPLANTATION GÉOGRAPHIQUE DU SITE DE SACLAY



Le site de Saclay

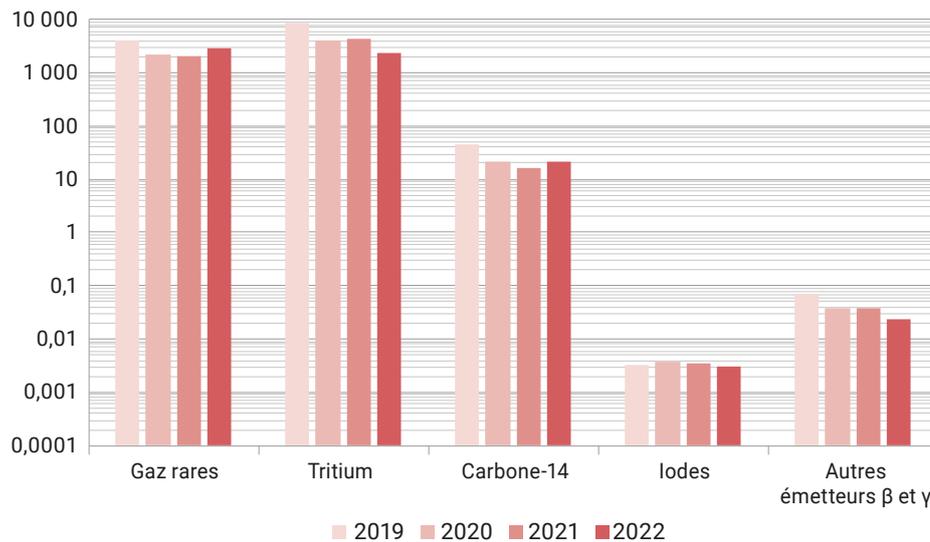
Avant rejet dans l'environnement, les effluents atmosphériques produits par les installations sont filtrés au moyen de filtres THE (très haute efficacité) et en complément pour certaines installations au niveau de piège à iodes. Un suivi en temps réel de la radioactivité de ces effluents rejetés par voie atmosphérique est réalisé en aval de ces filtres au niveau des différents émissaires du site, au moyen de dispositifs de mesure en continu. Le site comprend 12 émissaires en périmètre INB à fin 2023.

La figure 2 présente l'évolution des rejets atmosphériques et liquides sur la période allant de 2019 à 2022.

Outre les gaz rares qui se dissipent dans l'air et sont sans conséquence sur les autres composantes de l'environnement, le tritium prédomine très largement tant dans les rejets atmosphériques que dans les rejets liquides du site.

FIGURE 2 / REJETS ANNUELS ATMOSPHÉRIQUES ET LIQUIDES DES INSTALLATIONS DU SITE DE SACLAY SUR LA PÉRIODE 2019-2022 (GBq/an)

Rejets atmosphériques INB + ICPE (GBq)



Effluents liquides INB + ICPE (GBq)

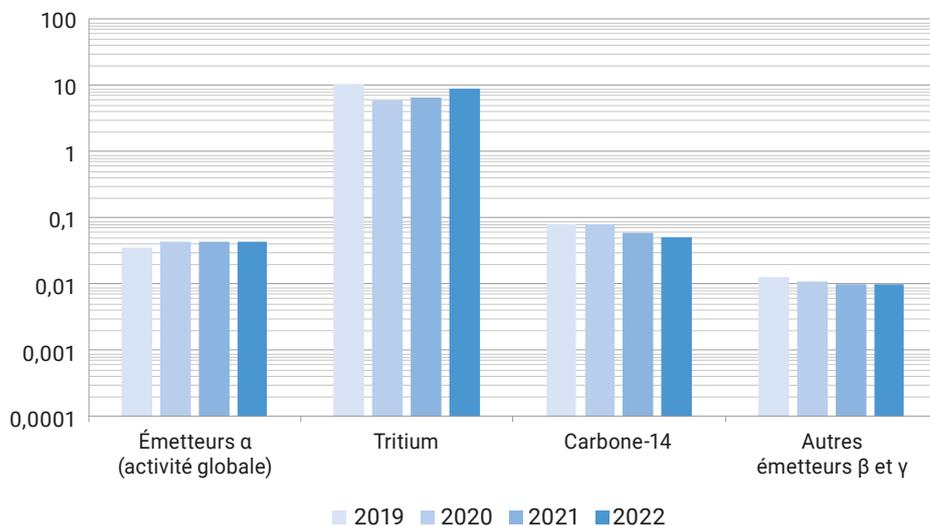


TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DU SITE DE SACLAY

Milieu surveillé ou nature du contrôle	CEA	IRSN
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement continu avec mesures journalières d'α et β globaux (aérosols), quadrimensuelles de l'^{131}I par spectrométrie γ (halogènes) et du ^3H 1 point de prélèvement continu avec mesures mensuelles du ^{14}C 	<ul style="list-style-type: none"> 1 station de prélèvement en continu d'aérosols à 700 m³/h avec 1 mesure de spectrométrie γ à une fréquence hebdomadaire (localisée sur le site IRSN d'Orsay, à 3,5 km à vol d'oiseau) 1 piègeur passif tritium avec 1 mesure bimensuelle de la fraction HTO (localisé sur le site IRSN d'Orsay, à 3,5 km à vol d'oiseau)
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement dans l'environnement plus 20 points de clôture 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point
Pluie	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement hebdomadaire avec mesures de ^3H et β global En bimensuel : mesure de l'indice d'activité α global 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement : 1 mesure mensuelle ^3H et spectrométrie γ (localisé sur le site IRSN d'Orsay, à 3,5 km à vol d'oiseau)
Milieu récepteur des rejets liquides (eau et sédiments)	<ul style="list-style-type: none"> Eau : 3 points de prélèvement d'hebdomadaire à annuel avec mesures α et β globales, ^3H, potassium, ^{90}Sr et spectrométrie γ Sédiments : 6 points de prélèvement, de semestriel à quinquennal, avec mesures α et β globales, TOL, ^{14}C, potassium, ^{90}Sr, spectrométries γ et α Faune et flore aquatique : 2 points de prélèvement annuel avec mesures HTO et TOL, ^{14}C lié, ^{90}Sr, potassium et spectrométrie γ 	<ul style="list-style-type: none"> Eau : 3 points de prélèvement et 1 mesure semestrielle de : ^3H, potassium, Sr, spectrométrie γ Sédiments : 1 point de prélèvement et 1 mesure semestrielle de Pu, Am, Sr, spectrométrie γ Faune et flore aquatiques : mesures HTO et TOL, ^{14}C, spectrométrie γ
Eaux de surface	<ul style="list-style-type: none"> 9 points de prélèvement, de mensuel à annuel, avec mesures α et β globales, ^3H, potassium, ^{90}Sr et spectrométrie γ 	
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> 23 points de prélèvement, de mensuel à annuel, avec mesures α et β globales, ^3H et potassium 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement et mesures semestrielles par point en ^3H
Lait	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement, de mensuel à annuel, avec mesures HTO et TOL, ^{14}C lié et spectrométrie γ (^{131}I et ^{40}K) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement semestriel et 1 mesure de HTO et spectrométrie γ
Fruits et légumes	<ul style="list-style-type: none"> 1 campagne annuelle avec mesure de spectrométrie γ (^{40}K), dont 1 point de prélèvement annuel avec mesures supplémentaires ^{14}C, HTO et TOL 	<ul style="list-style-type: none"> 7 points de prélèvement annuel avec HTO et TOL, ^{14}C et spectrométrie γ
Herbes	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement, de mensuel à annuel, avec mesures HTO et TOL, ^{14}C et spectrométrie γ (^{40}K) 	
Céréales	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement annuel et 1 mesure de spectrométrie γ
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement annuel avec une spectrométrie γ 	

En ce qui concerne les effluents atmosphériques, les rejets de tritium et de carbone-14 sont principalement attribuables aux recherches en biologie médicale effectuées hors INB par des laboratoires qui réalisent des marquages de molécules organiques. Les rejets d'iode proviennent principalement, pour l'iode-131, des tests réalisés afin de mesurer l'efficacité des pièges à iode. Les résultats des rejets en autres émetteurs bêta-gamma qui correspondent à une somme en majorité de seuils de décision ou proches du seuil avec dans ce cas une incertitude importante, ne sont pas liés à des émetteurs artificiels.

Concernant les effluents liquides comptabilisés en sortie de site, les résultats des rejets en émetteurs alpha correspondent à une somme en majorité de seuils de décision ou proches du seuil avec dans ce cas des incertitudes importantes ; l'activité annuelle en émetteur alpha dans les rejets, qui correspond majoritairement à l'activité naturelle (principalement uranium et descendants du radon) reste stable autour d'une valeur moyenne de 0,043 GBq depuis 2019. Les rejets liquides de tritium et de carbone-14 restent à des niveaux très faibles comparés aux rejets atmosphériques ; ces rejets sont de plus en baisse pour le carbone-14 depuis plusieurs années (- 38 % depuis 2019) et stables pour le tritium autour d'une valeur moyenne de 8 GBq depuis 2019 (même si une baisse a été perceptible en 2020 et 2021 autour de 6 GBq à mettre probablement au regard de la période de pandémie du Covid-19). Une diminution des rejets des autres émetteurs bêta-gamma est également à noter depuis plusieurs années (- 3 % depuis 2019).

La surveillance radiologique de l'environnement du site

Le CEA effectue un suivi radiologique de l'environnement dans un rayon de 7 km autour du site de Saclay, en déployant un programme de surveillance réglementaire comprenant près de 3 500 mesures radiologiques effectuées à des fréquences définies dans les différents compartiments de l'environnement (compartiments atmosphérique, aquatique et terrestre).

La surveillance atmosphérique des aérosols prélevés sur filtres, des halogènes piégés sur charbon actif ainsi que du tritium et du carbone-14 par barbotage, est réalisée à partir de mesures effectuées dans quatre stations fixes situées à Saint-Aubin, Orsigny, Saclay-Village et Villiers-le-Bâcle.

Au niveau de certaines de ces stations extérieures environnementales, sont également collectées des précipitations et prélevés des échantillons de sol (terre en surface) et de végétaux (herbes) pour analyses radiologiques. Cette surveillance du compartiment

terrestre est complétée par des mesures effectuées dans les denrées alimentaires issues des productions agricoles du plateau de Saclay.

La surveillance aquatique est effectuée aux abords du site au niveau des eaux réceptrices des rejets (étangs de Saclay, et déversement de l'aqueduc des Mineurs), des eaux de surface en amont et aval du site (la Bièvre, la Mérantaise, l'Yvette et les rus Saint-Marc, de Vauhallan et de Corbeville). Cette surveillance aquatique est complétée par des analyses effectuées sur les sédiments de plusieurs eaux de surface, ainsi que sur la flore et des poissons pêchés au niveau des étangs de Saclay. Elle comprend également un suivi des eaux souterraines de la nappe des sables de Fontainebleau au moyen de mesures effectuées dans différents piézomètres.

Le tableau 1 présente les plans de la surveillance radiologique environnementale réalisée autour du site de Saclay par le CEA et l'IRSN.

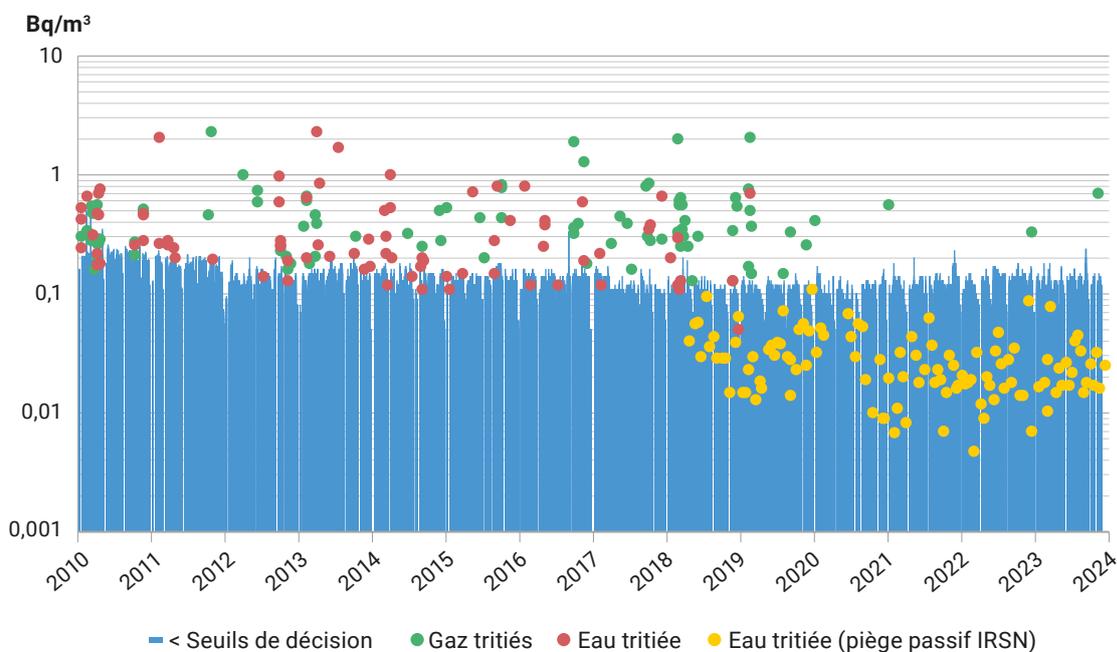
Influence du site de Saclay sur son environnement et exposition de la population

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 (chapitre 1), sont ainsi observées dans tous les compartiments de l'environnement.

Les 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 sous forme de gaz (HT et formes organiques comme par exemple le CTH3) (figure 3). Depuis 2020, les activités volumiques de tritium dans l'air au niveau de ces 4 stations sont très majoritairement inférieures aux seuils de décision ($\approx 0,12 \text{ Bq/m}^3$), en lien avec la forte diminution des activités industrielles d'un laboratoire du site spécialisé en chimie bio-organique. Seul le tritium sous forme de gaz tritiés (HT + formes organiques) présente par 3 fois des valeurs supérieures aux seuils de décision, avec une activité maximale de $0,7 \text{ Bq/m}^3$ provenant du prélèvement effectué à la station de Saclay en novembre 2023. Néanmoins, le seuil de décision de $0,12 \text{ Bq/m}^3$ ne permet pas de quantifier l'apport des rejets par rapport à l'activité liée au bruit de fond en tritium dans l'environnement qui est de l'ordre de $0,008 \text{ Bq/m}^3$. Les seuils de décision du CEA pour la mesure des activités de tritium dans la vapeur d'eau atmosphérique et dans l'eau de pluie, qui répondent aux objectifs réglementaires,

FIGURE 3 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM DANS L'AIR (eau tritiée et gaz tritiés) PRÉLEVÉ PAR LES STATIONS DE SURVEILLANCE DU CEA ET DE L'IRSN À PROXIMITÉ DU CEA DE SACLAY (Bq/m³)



ne permettent pas de distinguer l'influence des rejets gazeux des installations sur l'environnement terrestre à proximité du site de Saclay.

En revanche, les mesures significatives de l'IRSN, dont les seuils de décision sont plus bas, permettent de mettre en évidence une influence des rejets atmosphériques tritiés du site sur l'environnement. Les résultats d'analyses de tritium sous forme de vapeur d'eau effectuées par l'IRSN, entre 2021 et 2023, à l'aide du dispositif de piégeage passif localisé au niveau du bourg de Saclay, sont tous significatifs. Les activités comprises entre 0,005 et 0,09 Bq/m³ (moyenne à 0,024 Bq/m³) permettent de mettre en évidence une influence notable des rejets atmosphériques des installations du site de Saclay.

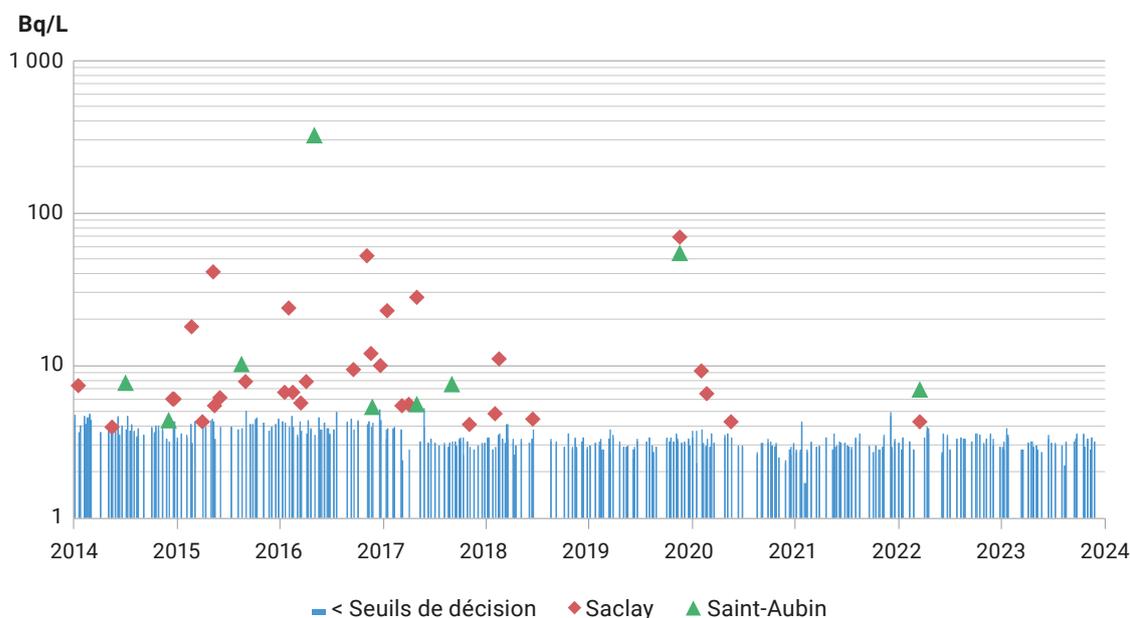
La grande majorité des activités de tritium dans l'eau de pluie pour la période de 2021 à 2023 se situe en dessous des seuils de décision (1,7-5 Bq/L). Seuls les prélèvements du 15 mars 2022 présentent des activités légèrement supérieures aux seuils de décision avec 4,3 Bq/L à Saclay et 6,8 Bq/L à Saint-Aubin. Ces activités ponctuellement mesurées sont très nettement en baisse, tant en nombre qu'en activité, en comparaison de celles mesurées pour les périodes des précédents bilans : 4,3 Bq/L et 70 Bq/L entre 2018 et 2020, et l'activité maximale de 320 Bq/L entre 2015 et 2017 (figure 4). Néanmoins, les seuils de décision de 1,7 à 5 Bq/L ne permettent pas

de quantifier l'apport des rejets par rapport à l'activité liée au bruit de fond en tritium dans l'environnement qui est de l'ordre de 0,8 Bq/L (0,3 à 1,8 Bq/L).

Pour ce qui concerne les résultats de tritium dans les prélèvements d'eau de pluie de l'IRSN localisés sur le site d'Orsay à un peu plus de 3 km du site de Saclay, les valeurs significatives (56 % des résultats) s'étendent de 0,8 à 3,3 Bq/L, du même ordre de grandeur que le bruit de fond mentionné précédemment.

Les activités de tritium libre dans les fruits, les herbages et le lait dépassent régulièrement les seuils de décision et les bruits de fond tout en étant en diminution depuis 2020, en lien avec la baisse des activités de tritium dans l'air et l'eau de pluie. Elles sont entre 2 et 8 Bq/kg frais dans l'herbe, entre 7 et 9 Bq/L dans le lait et entre 3 et 15 Bq/kg frais dans les fruits et légumes pour la période 2021-2023. En ce qui concerne les activités de tritium organiquement lié mesurées par le CEA pour cette période, elles sont toutes inférieures aux seuils de décision de l'ordre de 3 Bq/kg frais pour les fruits et légumes, de 13 Bq/kg frais pour les herbes et de 7 Bq/L pour le lait. Les activités mesurées par l'IRSN, notamment lors d'une étude spécifique réalisée en 2021, sont toutes supérieures aux seuils de décision pour tous les types de végétaux. Elles sont comprises entre 0,6 et 10,4 Bq/kg frais pour les feuilles d'arbres, 0,1 et 2,6 Bq/kg frais pour les herbes et 0,09 et 0,52 Bq/kg frais pour les fruits et les légumes.

FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE COLLECTÉE AUX STATIONS DE SURVEILLANCE À PROXIMITÉ DU CEA DE SACLAY (Bq/L)



La figure 5 représente ces résultats en becquerel par litre d'eau de combustion (Bq/L_{ec}). Cette unité, plus précise que le Bq/kg frais, permet de mettre en évidence des activités très majoritairement au-dessus du bruit de fond et diminuant avec la distance au site, témoins de l'influence des rejets atmosphériques.

Les rejets du site de Saclay influencent l'environnement aquatique. Ainsi, dans l'aqueduc des Mineurs, canalisant les rejets liquides du site, les activités de tritium sur la période 2021-2023 varient de 3,7 à 20 Bq/L pour une activité moyenne de 8,96 Bq/L, proche de la moyenne de 8,8 Bq/L du précédent bilan 2018-2020 (figure 6). Il en va de même dans les étangs où l'activité volumique de tritium varie de 3,3 à 12 Bq/L sur cette même période (3 à 14 Bq/L bilan 2018-2020). Comme pour les précédents bilans, le nombre de résultats de mesure au-dessus des seuils de décision ainsi que les activités mesurées sont sensiblement plus élevés dans l'étang Vieux (figure 7).

Les activités de tritium libre dans les poissons et les roseaux des étangs sont de l'ordre, ou très légèrement supérieurs, au bruit de fond de tritium dans l'environnement et celles de tritium organiquement lié sont toutes inférieures au seuil de décision de l'ordre de 27 Bq/kg frais pour les roseaux.

Les eaux souterraines prélevées entre 2021 et 2023 au niveau de plusieurs piézomètres situés à l'extérieur

du site de Saclay, présentent des activités de tritium supérieures au bruit de fond avec une moyenne de 11,7 Bq/L sensiblement égale à la moyenne sur la période 2018-2020 de 10,5 Bq/L. Notons également que la diminution constatée depuis 2010 des activités de tritium des eaux de nappes des plus marquées par les rejets du site (F1 et F33), se poursuit pour F33 et semble se stabiliser pour F1 (figure 8). En revanche, le piézomètre F31 présente une fluctuation des activités entre 2020 et 2023, avec des activités comprises entre inférieures aux seuils de décision (3,5 Bq/L) et 19 et 21 Bq/L en octobre 2022 et mai 2020 respectivement.

L'impact dosimétrique des rejets atmosphériques et liquides de tritium sur la période 2021-2023 a pu être calculé pour l'inhalation, le transcutané et l'ingestion.

En prenant l'hypothèse de l'exposition continue d'un adulte au tritium présent dans l'atmosphère dans l'environnement de Saclay, la dose par inhalation et passage au travers de la peau (transcutané) serait de 0,0048 µSv/an. Cette dose est très inférieure à celle due à l'ingestion de denrée et évaluée ci-après. Le profil type retenu correspond à un adulte qui consommerait 100 % de son eau de boisson provenant d'un forage dans la nappe phréatique des sables de Fontainebleau, mangerait 5,3 kg⁽¹⁾ de poissons par an provenant de l'étang Neuf, et s'approvisionnerait en légumes et en produits animaux produits localement.

(1) Cette valeur est proposée par l'InVS-Anses et l'Afssa pour la consommation annuelle de poissons d'eau douce.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS DE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ (Bq/L d'eau de combustion)
DANS LES VÉGÉTAUX TERRESTRES PRÉLEVÉS PAR L'IRSN SUR LA PÉRIODE 2021-2023
DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE SACLAY

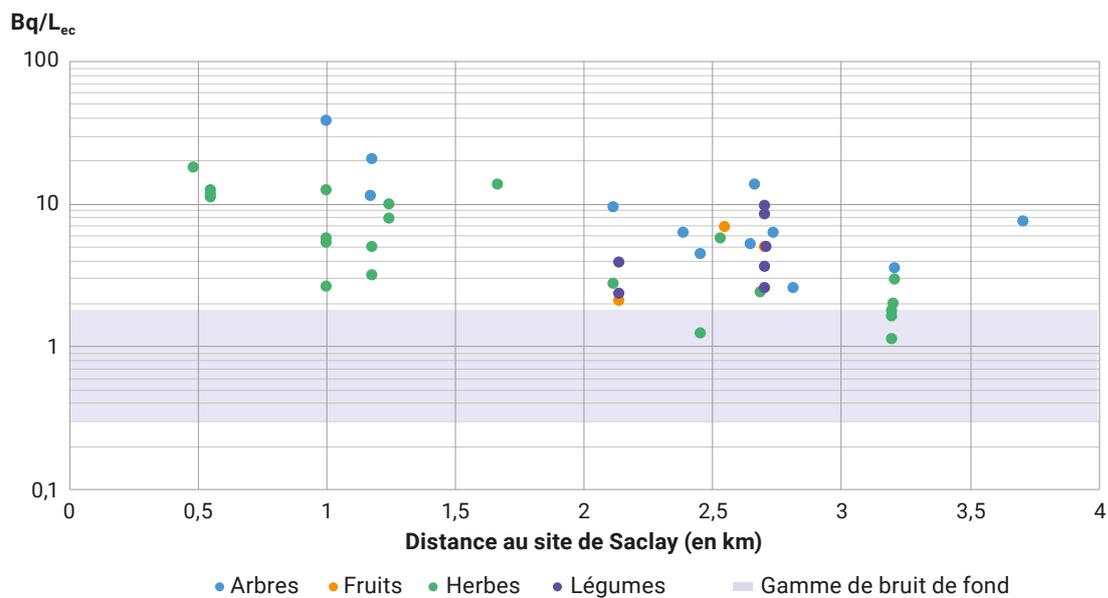


FIGURE 6 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS L'EAU ARRIVÉE PAR L'AQUEDUC DES MINEURS À L'ÉTANG VIEUX (Bq/L)
(données CEA et IRSN)

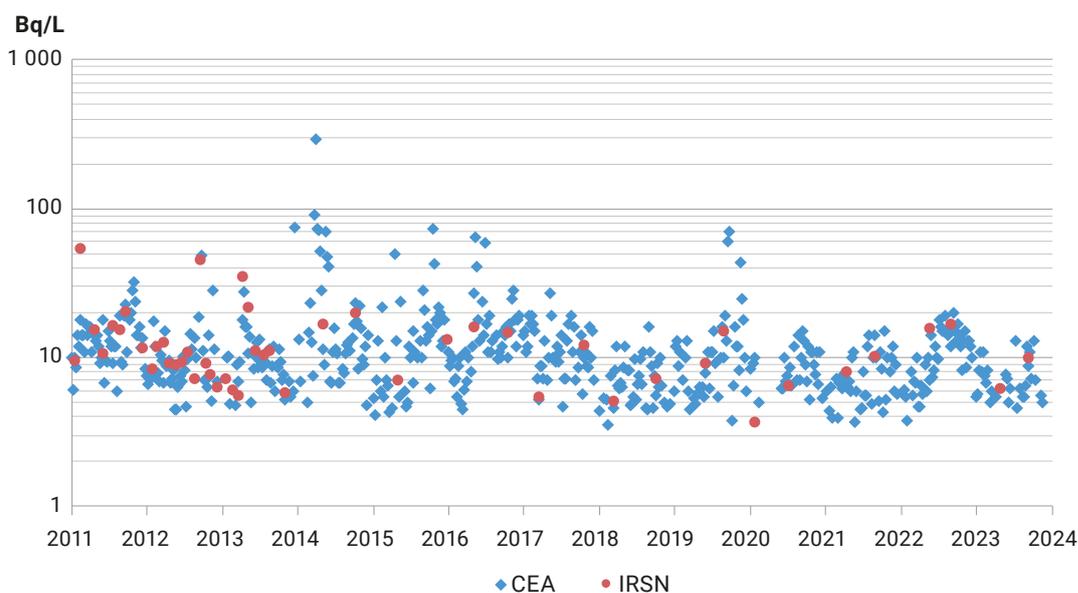


FIGURE 7 / ACTIVITÉS DE TRITIUM LIBRE DANS L'EAU DES ÉTANGS VIEUX ET NEUF (Bq/L) (données CEA)

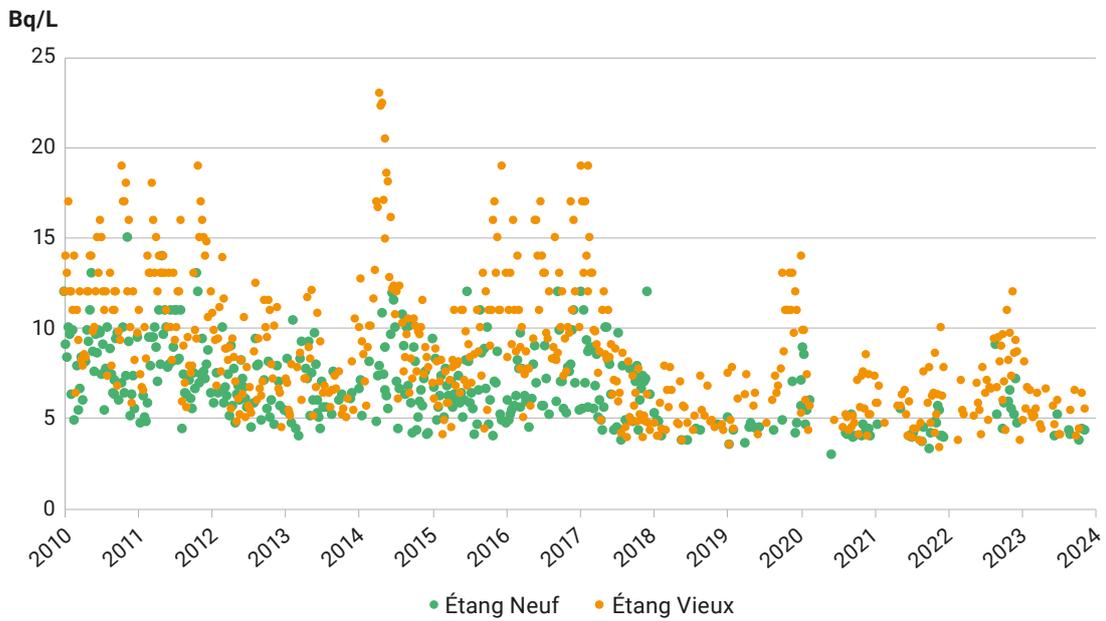
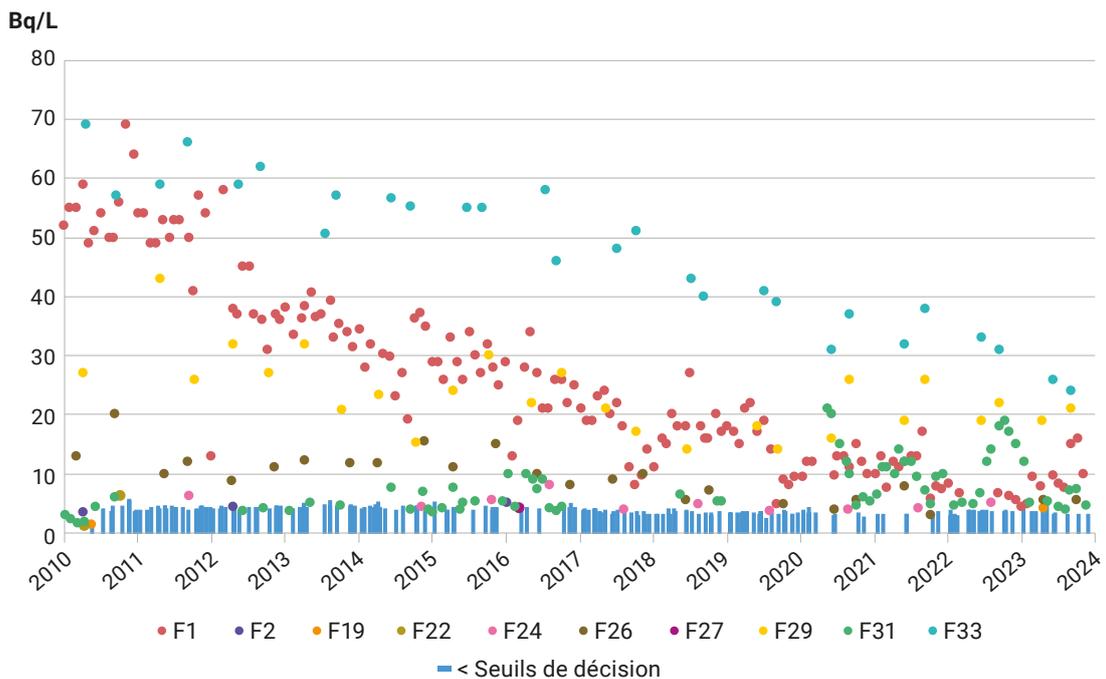


FIGURE 8 / ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION DE TRITIUM DANS L'EAU DE NAPPE DU PLATEAU DE SACLAY ISSUE DE DIFFÉRENTS PIÉZOMÈTRES EXTÉRIEURS AU SITE (Bq/L)



Sur la base de ces hypothèses, la dose ingestion engagée par cette personne serait de 0,16 µSv/an pour la période 2021-2023, dont 90 % proviendraient de l'ingestion d'eau ; cette dose avait été estimée à 0,13 µSv/an pour la période antérieure (2018-2020). Elle est par ailleurs plus élevée que celle estimée par le CEA pour 2021 de 0,07 µSv/an pour un adulte de type pêcheur local. La différence entre les deux estimations provient principalement d'un choix différent pour le taux d'autoconsommation de l'eau de boisson consommée par le groupe de référence pris en compte pour l'estimation des doses. L'IRSN a appliqué un taux de 100 % et le CEA a opté pour une consommation à 50 % de leur eau de boisson en provenance d'un forage dans la nappe souterraine des sables de Fontainebleau.

Carbone-14

Depuis 2015, grâce à l'abaissement des seuils de décision, le CEA mesure régulièrement le carbone-14 dans l'air, essentiellement sous forme de dioxyde de carbone ($^{14}\text{CO}_2$). Son activité volumique moyenne, sous cette forme, s'établit ainsi à 0,044 Bq/m³ sur la période étudiée, ce qui correspond au bruit de fond radiologique environnemental.

Ces améliorations métrologiques permettent également la mesure presque systématique du carbone-14 dans les échantillons de lait, d'herbage et de fruits/légumes (figure 9). En cohérence avec les activités

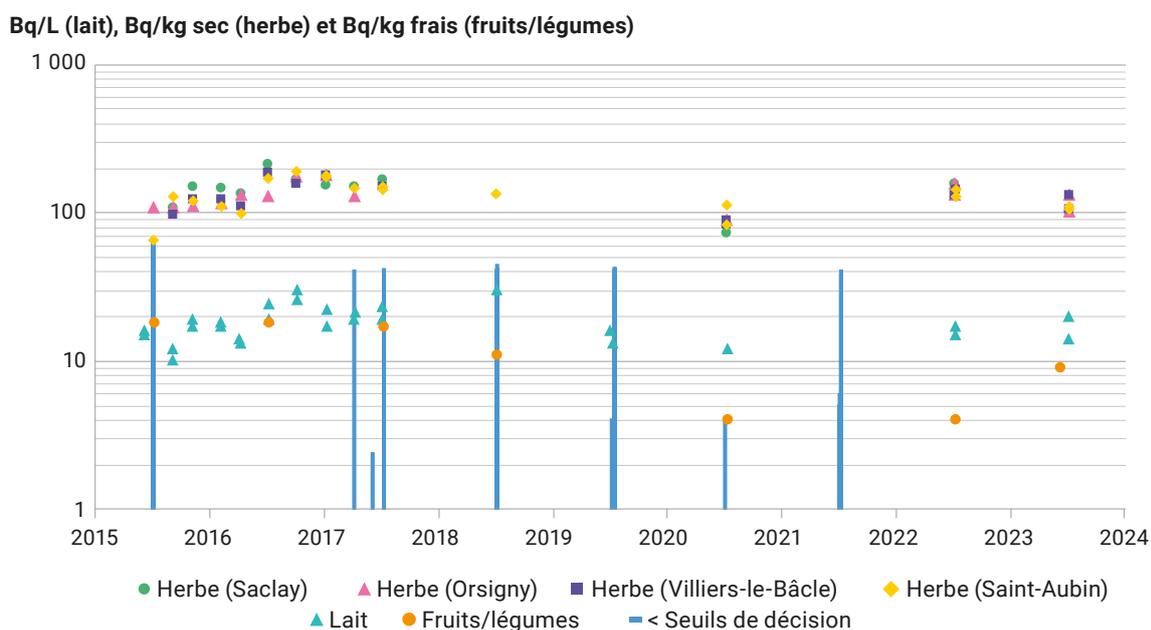
de $^{14}\text{CO}_2$ mesurées dans l'air sur la période 2021-2023, les activités moyennes mesurées dans le lait, les fruits, les légumes et l'herbe (respectivement de 16,5 Bq/L, 6,5 Bq/kg frais et 125,25 Bq/kg sec) ne se différencient pas du bruit de fond du carbone-14 (de l'ordre de 16 Bq/L pour le lait et jusqu'à plus de 100 Bq/kg sec pour les herbages). L'influence des rejets atmosphériques de carbone-14 du site de Saclay n'est pas quantifiable dans l'environnement terrestre.

Bien que les rejets liquides annuels de carbone-14 soient significativement plus faibles que ceux de tritium, les activités dans les poissons de l'étang Vieux et de l'étang Neuf restent nettement supérieures au bruit de fond. Pour les poissons prélevés entre 2021 et 2023, l'activité massique moyenne obtenue de 430 Bq/kg frais est proche de celle de 2018-2020 de 411 Bq/kg frais.

Ces activités sont à comparer à un bruit de fond naturel de ce radionucléide dans les poissons de l'ordre de 22 Bq/kg frais. La durée de vie des poissons prélevés (carpe et silure) est importante, de sorte qu'il est probable que ces activités de carbone-14 soient le résultat de l'accumulation dans ces étangs de plusieurs années, voire dizaines d'années de rejets.

La pêche dans l'étang Vieux, classé ZNIEFF⁽²⁾ est interdite ; ce n'est pas le cas dans l'étang Neuf. Une personne qui consommerait 5,3 kg/an de poissons

FIGURE 9 / ACTIVITÉ VOLUMIQUE ET MASSIQUE DE CARBONE-14 DANS LE COMPARTIMENT TERRESTRE ENTRE 2015 ET 2023



(2) Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique.

pêchés dans l'étang Neuf, avec une activité moyenne ajoutée de 408 Bq/kg, recevrait une dose annuelle de 1,5 µSv. Cette valeur est très proche de celle obtenue lors du précédent *Bilan radiologique*, sur la période 2018-2020 (1,2 µSv).

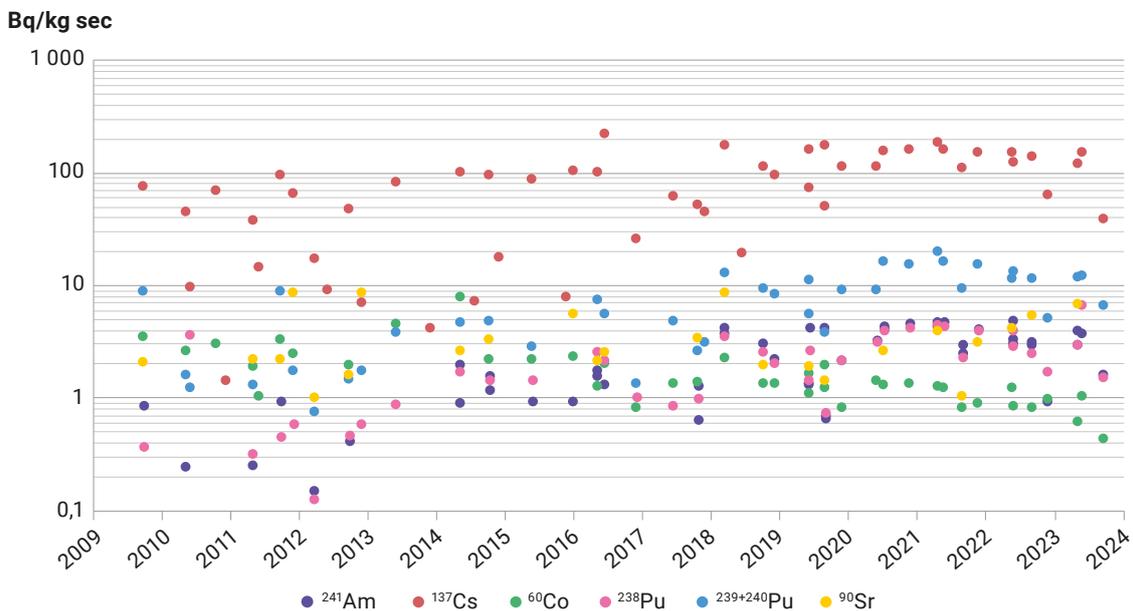
Les autres radionucléides

Excepté 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 activités inférieures aux seuils de décision. Toutefois, comme au cours de la période d'étude précédente, de l'iode-131 a été détecté significativement 1 fois au cours de cette période : en avril 2021 à hauteur de 0,19 µBq/m³. Cette activité est du même ordre que celles mesurées à plusieurs reprises au cours des années antérieures (cf. les *Bilans radiologiques 2015-2017 et 2018-2020*). Du cobalt-60 a également été quantifié à des niveaux de traces à plusieurs reprises entre mai et juillet 2021, (entre 0,05 et 0,18 µBq/m³) et en janvier 2023 (0,03 µBq/m³). De tels épisodes ont également été observés par le passé et seraient en lien avec les travaux en cours sur le site de Saclay (nettoyage de cellules chaudes de l'INB 29 – Ex Cis-Bio). Ces travaux se sont terminés en 2023 et ne devraient donc plus engendrer de détection de cobalt-60.

Les prélèvements de sédiments dans l'aqueduc des Mineurs révèlent la présence de césium-137, cobalt-60, plutonium, strontium-90 et américium-241 (figure 10). La présence de cobalt-60, les activités mesurées en césium-137 (de quelques becquerels à plusieurs dizaines, voire centaines de Bq/kg sec) ainsi que le rapport d'activité ²³⁸Pu/²³⁹⁺²⁴⁰Pu, supérieur de 7 à 18 fois à celui caractéristique des retombées atmosphériques globales (de l'ordre de 0,03) indiquent que ce marquage est en grande partie imputable aux rejets passés d'effluents liquides du site. Ce marquage est également visible dans les sédiments des étangs avec cependant des activités et/ou des fréquences d'apparition des radionucléides précédemment cités plus faibles. Enfin, dans les sédiments prélevés dans les cours d'eau situés en aval des étangs, seul le césium-137 est quantifiable, à des activités qui ne se différencient pas de celle du bruit de fond de ce radionucléide.

Des traces de césium-137 et de strontium-90 sont encore détectables dans l'eau des étangs. Quand il est mesuré, le césium-137 n'y dépasse pas 4 mBq/L tandis que la moyenne du strontium-90 s'établit à 2,4 mBq/L sur la période étudiée. Pour les roseaux, les activités de césium-137 sont en moyenne de 1,9 Bq/kg sec et pour le strontium-90 de 0,7 Bq/kg sec. Dans les poissons, l'activité moyenne du césium-137 est d'environ 0,25 Bq/kg frais et celle du strontium-90 est inférieure au seuil de décision de 0,03 Bq/kg frais. Ces activités résultent principalement des anciens rejets du site CEA et des retombées atmosphériques globales.

FIGURE 10 / ACTIVITÉS MASSIQUES DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES D'INTÉRÊT PRÉSENTS DANS LES SÉDIMENTS DE L'AQUEDUC DES MINEURS À L'ÉTANG VIEUX (Bq/kg sec)



Le site de Valduc

Rejets et plans de surveillance

Le site de Valduc est dédié à la recherche et au développement des technologies sur les matériaux nucléaires nécessaires à la force de dissuasion nucléaire française. C'est notamment à Valduc qu'en 1957 a été installé le réacteur à neutrons rapides Rachel, qui a permis les premières études de criticité en France. Depuis, les spécialistes travaillant sur le site se chargent aussi de l'entretien et du démantèlement des têtes nucléaires. Le site est situé en milieu rural,

entouré de forêts et de terres agricoles dans la commune de Salives, à 45 km au nord-ouest de Dijon dans le département de la Côte-d'Or (figures 1A et 1B). Les installations du site rejettent principalement du tritium sous forme gazeuse dans l'atmosphère. Les rejets ont considérablement diminué depuis les années 1970 et se sont stabilisés depuis les années 2000 autour de 200 TBq/an (figure 2). Pour contrôler et estimer l'impact des rejets du site sur l'homme et l'environnement, le CEA et l'IRSN ont mis en place depuis l'ouverture du site un plan de surveillance centré sur ce radionucléide (tableau 1).

FIGURE 1A / LOCALISATION DES POINTS DE SURVEILLANCE DU CEA AUTOUR DU SITE DE VALDUC

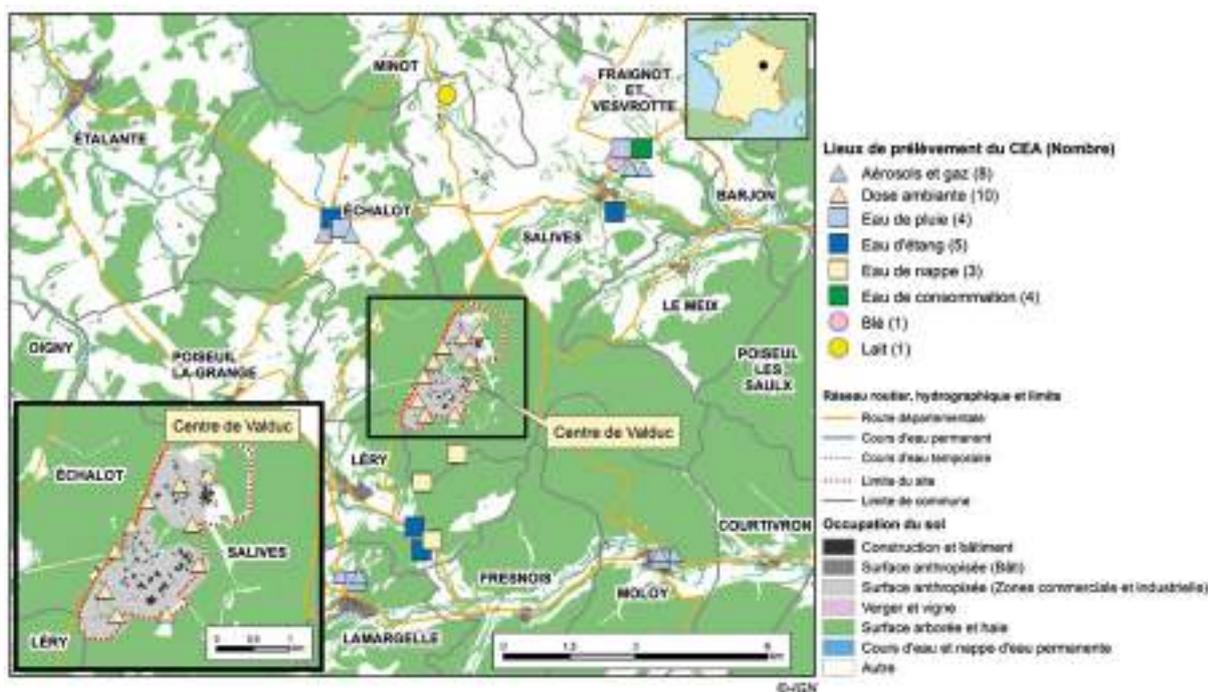


FIGURE 1B / LOCALISATION DES POINTS DE SURVEILLANCE DE L'IRSN AUTOUR DU SITE DE VALDUC EN 2023

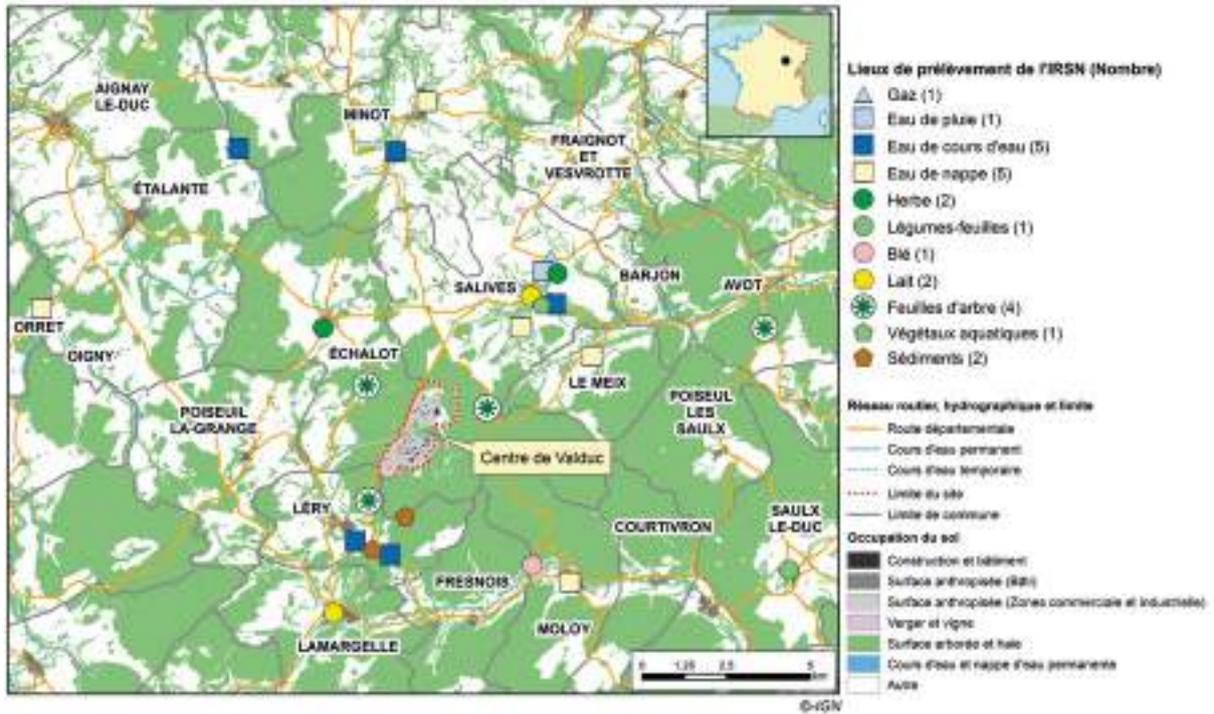


FIGURE 2 / REJETS D'EFFLUENTS GAZEUX ATMOSPHÉRIQUES DE TRITIUM DU SITE DE VALDUC (TBq/an)

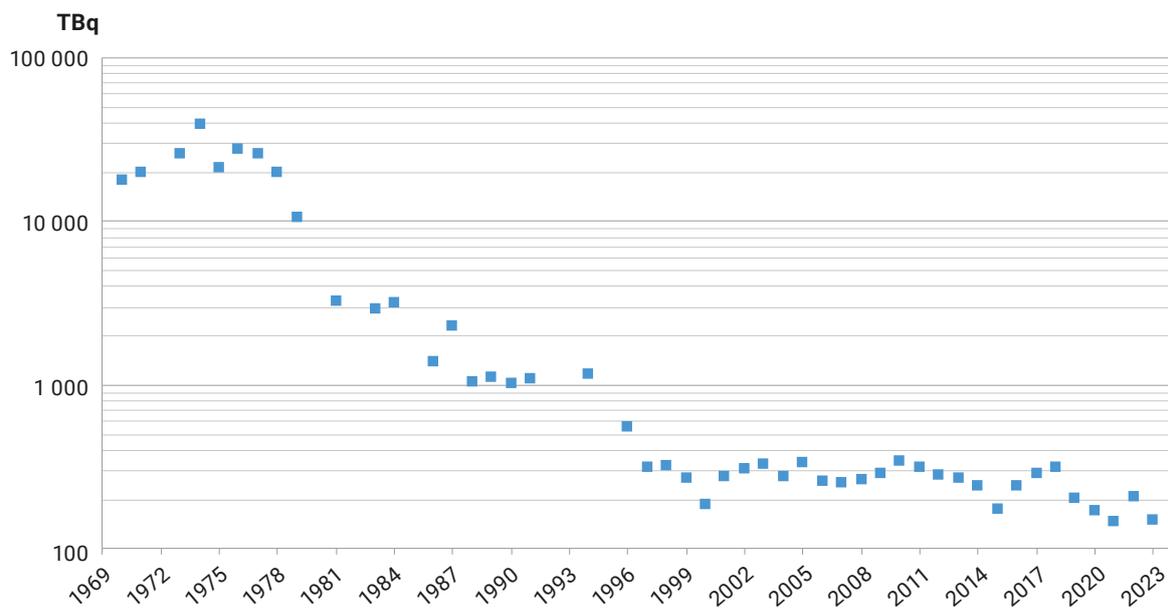


TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DU SITE DE VALDUC

Milieu surveillé ou nature du contrôle	CEA	IRSN
Rayonnement gamma ambiant	<p>Jusqu'en 2019 :</p> <ul style="list-style-type: none"> 10 dosimètres passifs en bord de site ou sur le site : débit de dose γ ambiant ; 4 dosimètres passifs dans l'environnement à Échalot, Léry, Moloy et Salives : débit de dose γ ambiant. <p>À partir de 2020* :</p> <ul style="list-style-type: none"> 10 dosimètres passifs en bord de site : débit de dose γ ambiant ; 1 balise irradiation sur le site : débit de dose γ ambiant continu. 	
Aérosols atmosphériques	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvement à Échalot, Moloy et Léry : activités α et β globales (hebdomadaires) 1 point de prélèvement à Salives : activités α et β globales (quotidiennes) 	
Tritium dans l'air	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement à Échalot, Moloy, Léry et Salives : tritium dans l'air HTO - HT (hebdomadaires) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement à Salives : tritium dans l'air HTO - HT (bimensuelle)
Eau de pluie	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement à Échalot, Moloy, Léry, Salives : tritium (hebdomadaire) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement à Salives : tritium (hebdomadaire)
Lait	<ul style="list-style-type: none"> Jusqu'en 2019 : 1 point de prélèvement à Salives (Larçon) : tritium, spectrométrie γ (mensuelles) À partir de 2020* : 1 point de prélèvement à Salives (Larçon) : HTO et TOL, spectrométrie γ (trimestrielles) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement au nord-ouest et au sud-ouest du site : HTO (trimestrielles), spectrométrie γ
Herbe Production agricole de référence	<ul style="list-style-type: none"> Jusqu'en 2019 : 4 points de prélèvement d'herbe à Échalot, Moloy, Léry et Salives : tritium (mensuelle), spectrométrie γ (rotation mensuelle sur les 4 points) À partir de 2020* : 1 point de prélèvement d'une production agricole à Salives (Lieu-dit Montarmet) : HTO et TOL (annuelles) 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement à Échalot et Salives : HTO et TOL (annuelles)
Feuilles d'arbres		<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement à Avot, Échalot, Léry (depuis 2023), Salives : HTO et TOL (annuelles)
Légumes		<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement à Saulx-le-Duc : HTO et TOL (annuelles)
Blé		<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement d'un mélange départemental : TOL, spectrométrie γ (annuelles)
Eau de surface	<ul style="list-style-type: none"> Jusqu'en 2019 : 5 points de prélèvement à Échalot, Moloy, Salives, Léry et au Grand Étang sur le site du CEA : activités α et β globales, tritium, spectrométrie γ À partir de 2020* : 5 points de prélèvement à Échalot, Moloy, Salives, Léry et le Ru de Noirvau : activités α et β globales, tritium, concentration en potassium total 	<ul style="list-style-type: none"> Jusqu'en 2022 : 7 points de prélèvement à Léry (2 points), Minot, Moitron, Étalante, Orret et Salives : tritium (semestrielle) À partir de 2023 : 5 points de prélèvement à Léry (2 points), Minot, Moitron, Salives
Eau de source ou résurgence	<ul style="list-style-type: none"> À partir de 2020* : 3 points de prélèvement dans les résurgences R111, R14 (mensuelle) et R22 (trimestrielle) : tritium 	<ul style="list-style-type: none"> 5 points de prélèvement à Étalante, Le Meix, Minot, Moloy, et Salives : activité β globale, potassium, tritium (semestrielles)
Sédiments		<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement à Léry : spectrométrie γ et uranium isotopique (depuis 2022)
Phanérogames aquatiques		<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement à Salives : HTO et TOL (annuelles) (depuis 2022)
Eau de consommation	<ul style="list-style-type: none"> À partir de 2020* : 4 points de prélèvement dans les villages Échalot, Moloy, Salives, Léry : tritium (trimestrielle) 	

* En application de l'arrêté du 5 novembre 2018 autorisant le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives à poursuivre les rejets d'effluents liquides et gazeux, les prélèvements et consommations d'eau pour l'exploitation de l'installation nucléaire de base secrète de Valduc.

Influence du site de Valduc sur son environnement

L'influence des rejets de tritium sur l'environnement du centre de Valduc est visible dans toutes les composantes de l'environnement sur quelques dizaines de kilomètres tout autour du site. Le tritium dans l'air est prélevé avec une fréquence hebdomadaire par des barboteurs sur 4 stations de prélèvement situées sur les communes de Salives (NE), Échalot (N-NO), Léry (S-SO) et Moloy (SE). Le tritium dans l'air se présente sous deux formes : vapeur d'eau tritiée (HTO) et gaz (HT et autres composés organiques gazeux tritiés), le tritium sous forme de vapeur d'eau étant prédominant. Les résultats de mesures sont présentés dans la figure 3, et les activités moyennes et maximales par station dans le tableau 2. L'activité moyenne de la vapeur d'eau tritiée sur la période 2021-2023 est de 0,5 Bq/m³ à Échalot. Les activités les plus élevées sont mesurées au nord du site, notamment sur la commune d'Échalot avec une activité maximale de 3,5 Bq/m³ d'air en septembre 2023 et à Salives avec 2,4 Bq/m³ en octobre 2023. L'IRSN assure également depuis 2019 une surveillance du tritium dans l'air sur la commune de Salives à l'aide de piègeurs passifs. Au cours de la période 2021-2023, ces résultats d'analyses permettent de calculer une activité moyenne de tritium dans la vapeur d'eau tritiée de 0,22 Bq/m³ ; cette moyenne était de 0,26 Bq/m³ sur la période précédente (2018-2020).

La figure 3 montre que si une forte variabilité est observée, les gammes d'activités tendent à diminuer dans le temps en accord avec la diminution des rejets au cours de ces dernières années. Ces activités de tritium dans l'air sont très supérieures au bruit de fond actuel de tritium atmosphérique hors influence d'une installation nucléaire qui est de l'ordre de 0,008 Bq/m³ d'air pour la vapeur d'eau tritiée.

L'activité de tritium dans l'eau de pluie est également mesurée sur ces mêmes communes (tableau 3). Entre 2021 et 2023, son activité moyenne s'établit à 13,2 Bq/L à Salives, valeur inférieure à celle mesurée pour la période 2018-2020 (25,8 Bq/L). Sur la période 2021-2023, les activités maximales dans les prélèvements d'eaux de pluie restent supérieures au nord du site, comme observé dans la vapeur d'eau de l'air. De manière générale, les activités de tritium dans l'eau de pluie sont en diminution par rapport à la période précédente (figure 4).

Tous les prélèvements de végétaux prélevés dans le compartiment terrestre présentent des activités de tritium libre et/ou de tritium organiquement lié supérieures au bruit de fond de tritium.

Parmi les indicateurs biologiques terrestres, des prélèvements d'herbes sont réalisés par l'IRSN à fréquence annuelle sur les communes de Salives et d'Échalot. L'activité moyenne de tritium libre calculée à partir de l'ensemble des résultats obtenus sur ces deux stations s'établit à 12,4 Bq/L, cette activité est similaire à la valeur moyenne calculée dans l'eau de pluie prélevée à Salives. Dans les échantillons de lait, prélevés au nord du site, l'activité moyenne de tritium libre calculé pour la période 2021-2023 atteint 17 Bq/L, proche de l'activité moyenne calculée dans les herbes situées dans la même orientation. Les mesures de tritium organiquement lié réalisées dans les échantillons d'herbe permettent de calculer une activité moyenne de 42,7 Bq/L d'eau de combustion, soit 5,8 Bq/kg frais. Les feuilles d'arbres, prélevées dans différentes orientations par rapport au site témoignent également d'un net marquage par les rejets tritiés du site de Valduc, avec des activités de tritium organiquement lié dépassant 300 Bq/L d'eau de combustion (75,2 Bq/kg frais) dans les échantillons prélevés en direction de Salives (figure 5). Ces résultats sont cohérents avec ceux mesurés au cours des années précédentes.

TABLEAU 2 / ACTIVITÉS MOYENNES ET MAXIMALES DE TRITIUM SOUS FORME DE VAPEUR D'EAU (HTO) ÉTABLIES SUR LA BASE DES RÉSULTATS DE MESURES SIGNIFICATIFS OBTENUS DANS L'AIR AUTOUR DU SITE DE VALDUC ENTRE 2021 ET 2023 (Bq/m³)

	HTO (Données CEA)		HTO (Données IRSN)	
	Valeur moyenne	Valeur maximale	Valeur moyenne	Valeur maximale
Salives	0,3	2,4	0,22	0,89
Échalot	0,5	3,5	-	-
Léry	-*	1,12	-	-
Moloy	-*	0,41	-	-

* Dans ce bilan radiologique, une moyenne n'est calculée que si le taux de valeurs supérieures aux seuils de décision est au moins de 50 %, ce qui n'est pas le cas des résultats de mesures de l'activité de l'air de tritium sur les stations de Léry et Moloy (chapitre 5.2).

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS L'AIR SOUS FORME DE VAPEUR D'EAU (HTO, en haut)
ET SOUS FORME DE GAZ (HT et autres composés organiques gazeux tritiés, en bas)
MESURÉES À FRÉQUENCE HEBDOMADAIRE DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE VALDUC (Bq/m³)

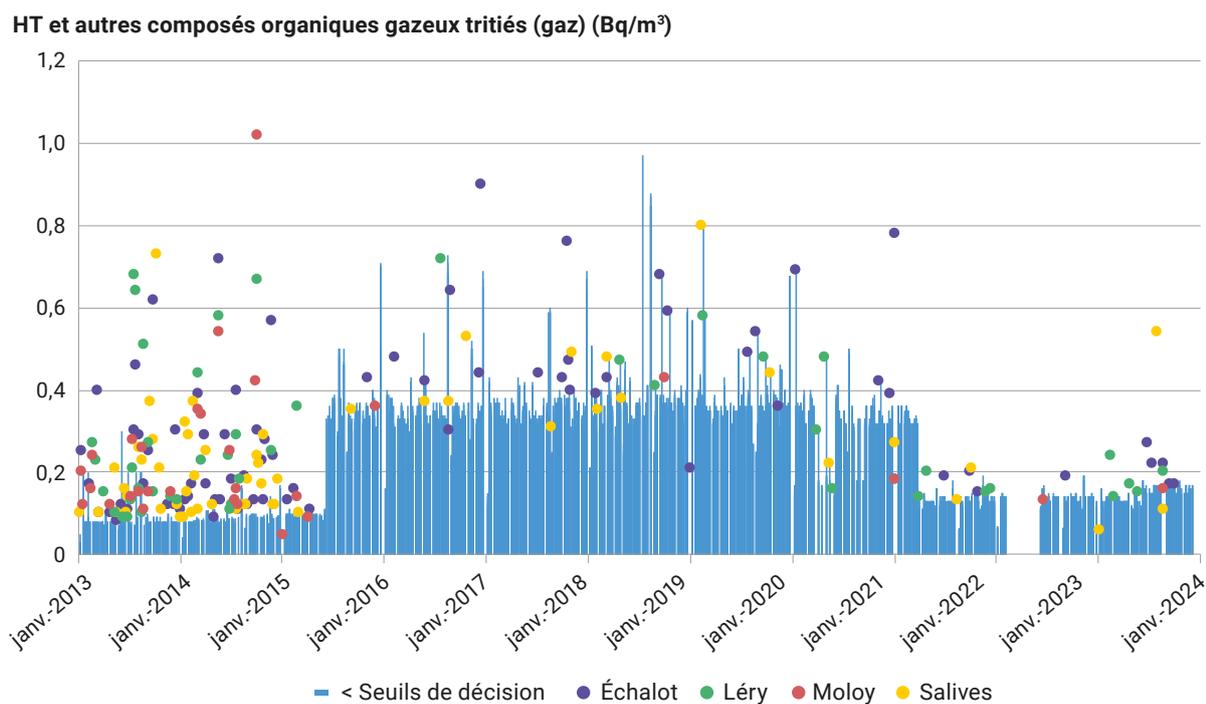
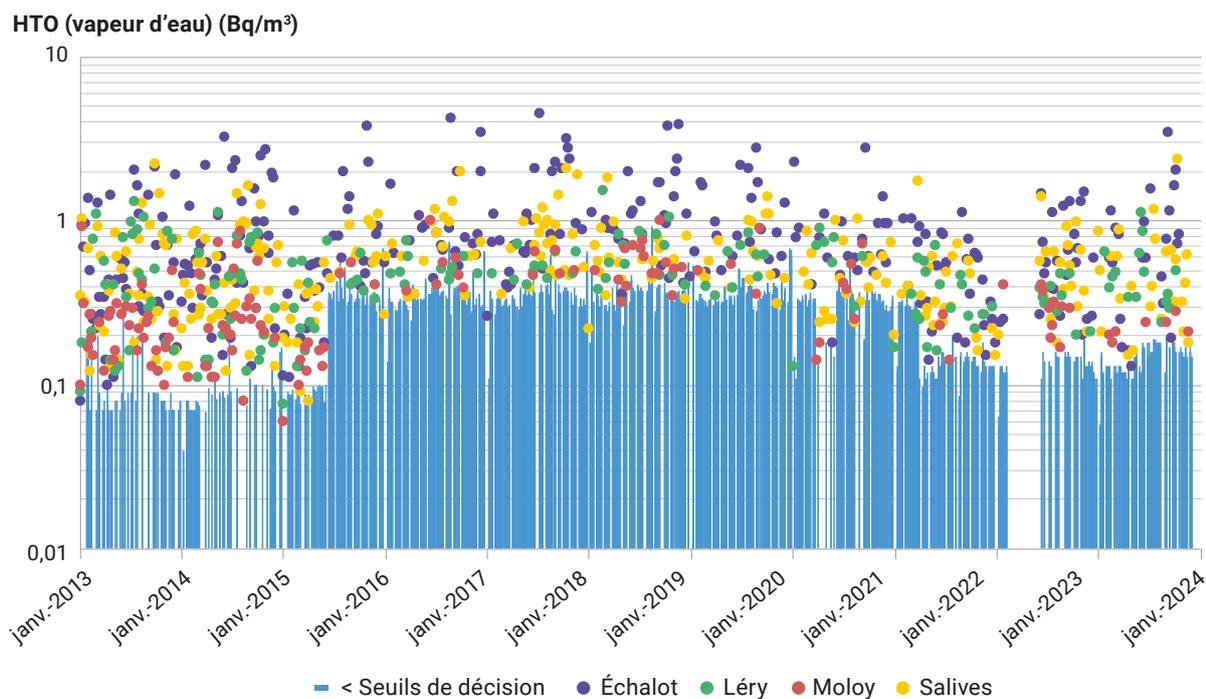
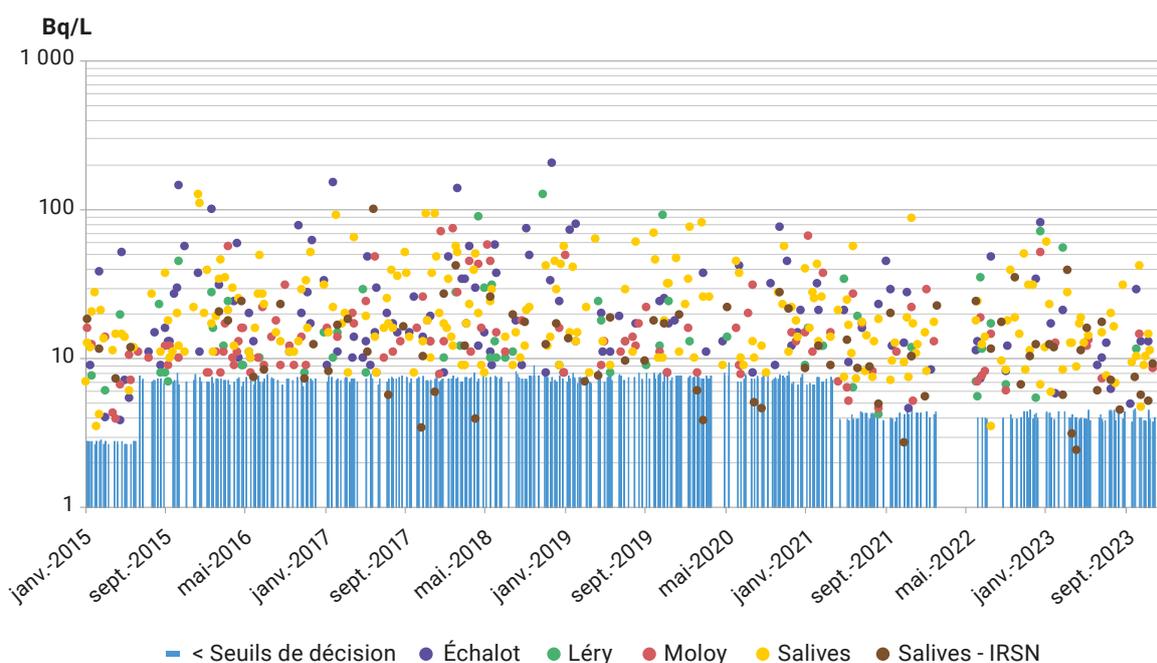


TABLEAU 3 / ACTIVITÉS MOYENNES ET MAXIMALES DE TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE ÉTABLIES SUR LA BASE DES RÉSULTATS DE MESURE SIGNIFICATIFS AUTOUR DU SITE DE VALDUC (Bq/L)

Commune		2018-2020		2021-2023	
		Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
Salives	Nord	25,8	81,0	13,2	103
Échalot		33,7	206,0	-*	123
Léry	Sud	26,7	125,0	-*	71
Moloy		21,1	74,0	-*	67

* Dans ce bilan radiologique, une moyenne n'est calculée que si le taux de valeurs supérieures au seuil de décision est au moins de 50 % (chapitre 5.2).

FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE (Bq/L) PAR LE CEA À PROXIMITÉ DU SITE DE VALDUC ET PAR L'IRSN (uniquement à Salives)



Les activités moyennes de tritium organiquement lié (Bq/kg frais) de l'ensemble des végétaux (denrées, herbes et feuilles d'arbres) prélevés entre 2021 et 2023 sont présentées sur la figure 6, confirmant l'influence des rejets du site de Valduc dans l'environnement terrestre. Quelques prélèvements de denrées (salades, blé), réalisés annuellement sur les communes voisines du site, ont mis en évidence des activités comprises entre 0,24 Bq/kg frais dans les salades à 14,8 Bq/kg frais dans le blé. Ces activités sont supérieures aux valeurs du bruit de fond de tritium organiquement lié de 0,02 Bq/kg frais et 0,49 Bq/kg frais, respectivement.

Tous les résultats obtenus dans différents types de végétaux et dans le lait témoignent de l'influence des rejets tritiés du site de Valduc sur l'environnement proche et plus éloigné du site, quel que soit l'azimut considéré. Les communes situées au nord du site (Salives et Échalot) semblent plus régulièrement soumises aux rejets d'effluents du site de Valduc comme l'attestent les moyennes et les maximums des différents types de prélèvements très souvent supérieurs à ceux obtenus dans les communes situées au sud de l'installation.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS DE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ DANS LES FEUILLES D'ARBRES (Bq/L d'eau de combustion) À PROXIMITÉ DU SITE DE VALDUC (données IRSN)

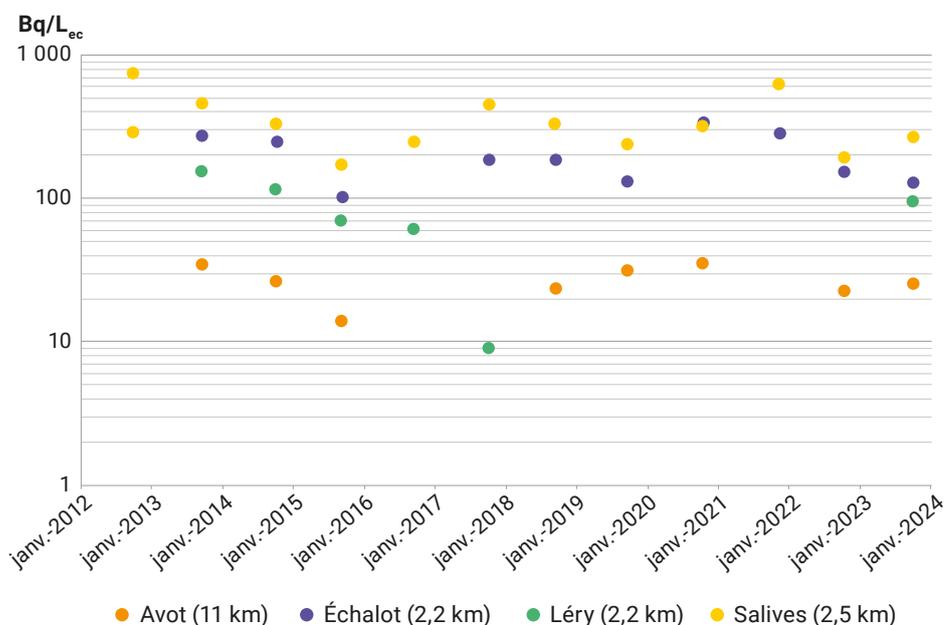
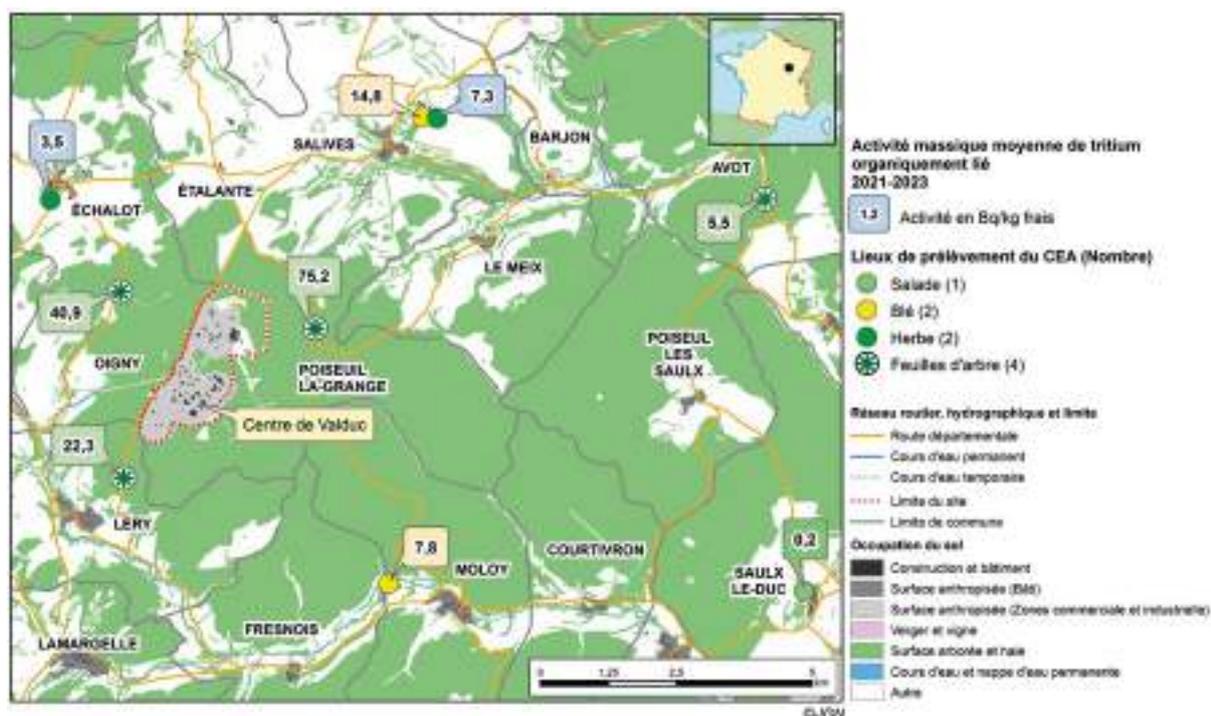


FIGURE 6 / ACTIVITÉS DE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ DANS LES VÉGÉTAUX SUR LA PÉRIODE 2021-2023 (Bq/kg frais)



La surveillance des nappes phréatiques est effectuée par des prélèvements d'eaux au niveau des résurgences des sources de Prélard et de Prégelan, sur des alimentations publiques : fontaine publique à Minot et à Moloy, et lavoir à Meix ainsi que, depuis 2020, par des prélèvements réalisés dans 3 piézomètres situés au sud des installations du site CEA de Valduc, dans la combe du ruisseau du Noirvau.

Les activités de tritium dans les eaux de nappes phréatiques évoluent entre $< 3,1$ et 116 Bq/L (figure 7). Les activités les plus élevées ont été mesurées dans les prélèvements effectués par le CEA sur deux piézomètres situés au sud du site, avec une moyenne de $82,7$ Bq/L et $84,8$ Bq/L. Parmi les eaux de sources prélevées par l'IRSN, la source Prégelan à Salives présente la moyenne la plus élevée avec $37,8$ Bq/L suivie de celle située sur la commune de Le Meix qui est de $17,3$ Bq/L. Les activités moyennes de tritium de ces sources sont inférieures à celles obtenues lors du précédent bilan radiologique. Les autres sources d'eau présentent des activités de tritium qui oscillent entre les seuils de décision ($< 2,3$ Bq/L) et $8,3$ Bq/L. Ainsi, la très grande majorité des prélèvements d'eau de nappe réalisés présente une activité de tritium supérieure au bruit de fond de ce radionucléide à distance de toute installation nucléaire ($0,8$ Bq/L).

Deux aquifères s'écoulent sous le site de Valduc et donnent naissance à plusieurs rivières. Au nord et à l'ouest, les eaux s'écoulent vers le bassin versant de la Seine ; au sud et à l'est, vers le bassin versant de la Saône. Les résultats de la surveillance montrent que l'activité de tritium des cours d'eau qui drainent le dôme de Valduc a nettement diminué au cours des années 1990 et 2000, et que cette diminution est plus lente ces dernières années. Cette évolution globale va de pair avec celle des rejets atmosphériques (figure 2).

Depuis le précédent *Bilan radiologique* et la modification de son plan de surveillance, le CEA ne prélève plus d'échantillons dans le Grand Étang, et l'IRSN n'y a plus accès, bien que les activités de tritium y étaient les plus élevées (activité volumique moyenne de $143,6$ Bq/L sur la période 2018-2020).

Ainsi, sur la période 2021-2023 ce sont les eaux de surface du ruisseau du Noirvau situé au sud du site qui présentent les activités de tritium les plus élevées avec une moyenne de 74 Bq/L (maximum de 87 Bq/L mesuré par le CEA en septembre 2022). Par dilution, les eaux de la Douix de Léry (dans laquelle se jette le Noirvau) et celles de l'Ignon (qui recueille les eaux de la Douix de Léry) présentent des activités moyennes sur la période 2021-2023 de $14,5$ Bq/L et $12,1$ Bq/L respectivement (activité maximale de $17,9$ Bq/L et $18,2$ respectivement). La Tille s'écoule à l'est du site avec une activité moyenne de $23,7$ Bq/L (activité maximale de 28 Bq/L). Ces résultats s'inscrivent dans une tendance à la baisse observée depuis plusieurs années, en lien avec la baisse des rejets d'effluents tritiés (figure 8).

Les cours d'eau s'écoulant vers le bassin versant de la Seine (le Brévon et la Digeanne) présentent un marquage en tritium inférieur à celui mesuré dans les cours d'eau s'écoulant vers le sud et l'est du site, avec une activité maximale de $11,6$ Bq/L entre 2021 et 2023. Ainsi, la surveillance des cours d'eau aux alentours du site met en évidence une influence des rejets de tritium du site de Valduc. Cette influence n'est pas perceptible au niveau de la Seine et du Revinson (à l'ouest du site) pour lesquels tous les résultats de mesure sont inférieurs aux seuils de décision ou assortis d'une incertitude qui ne permet pas de mettre en évidence un excès de tritium par rapport au bruit de fond actuel (de l'ordre de $0,8$ Bq/L).

Depuis 2021, l'IRSN prélève des sédiments dans le ruisseau du Noirvau et des mousses aquatiques dans la Tille en aval de Salives. Les résultats d'analyses pour les radionucléides émetteurs gamma d'origine artificielle témoignent de la seule présence de césium-137 avec des activités comprises entre $1,1$ et $12,1$ Bq/kg sec dans les sédiments et de $< 1,2$ à $2,6$ Bq/kg sec dans les mousses ; ces activités sont de l'ordre du bruit de fond et témoignent de la rémanence des retombées atmosphériques anciennes. Les activités de tritium organiquement lié dans les mousses aquatiques sont comprises entre $0,6$ et $5,2$ Bq/kg sec, proches ou supérieures au bruit de fond de tritium. Enfin, les activités d'uranium-234 et d'uranium-238 dans les sédiments (comprises entre $5,6$ et $26,2$ Bq/kg sec) sont dans la gamme des activités des sédiments prélevés en France à distance de toute installation nucléaire. La présence d'uranium-236 dans tous les échantillons de sédiments prélevés depuis 2021, avec des activités comprises entre $0,006$ et $0,02$ Bq/kg sec, témoigne de l'influence d'activités anciennes du site de Valduc.

FIGURE 7 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS LES EAUX SOUTERRAINES PRÉLEVÉES À PROXIMITÉ DU SITE DE VALDUC (Bq/L)

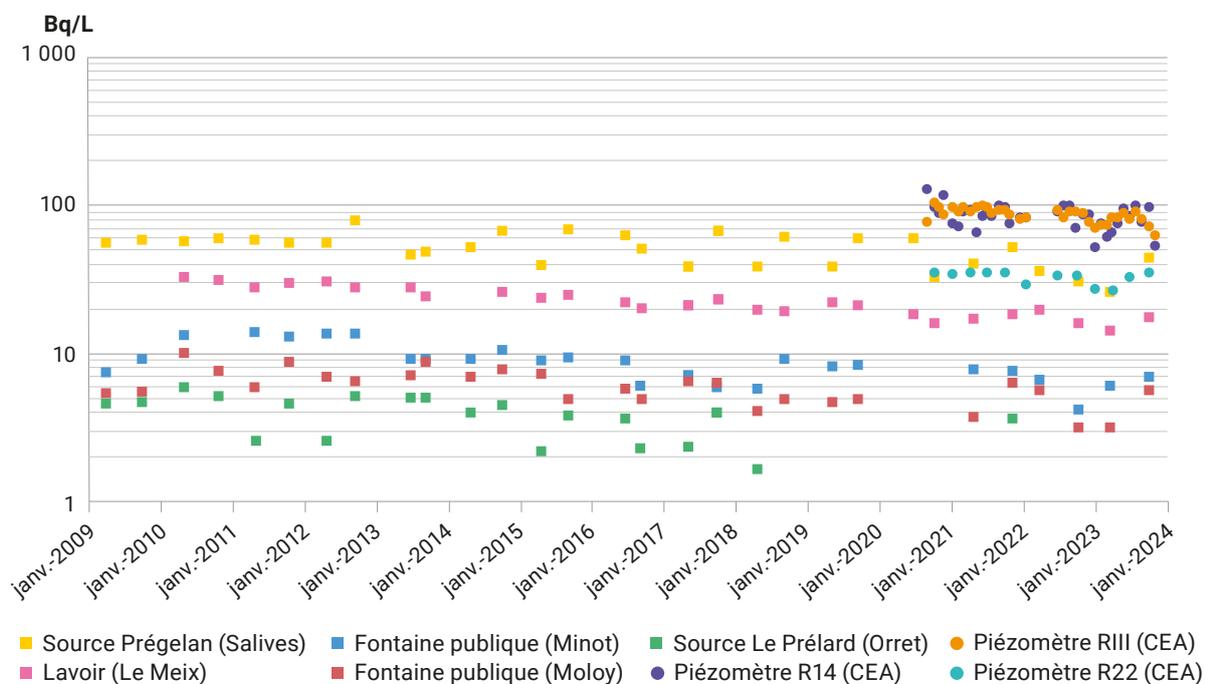
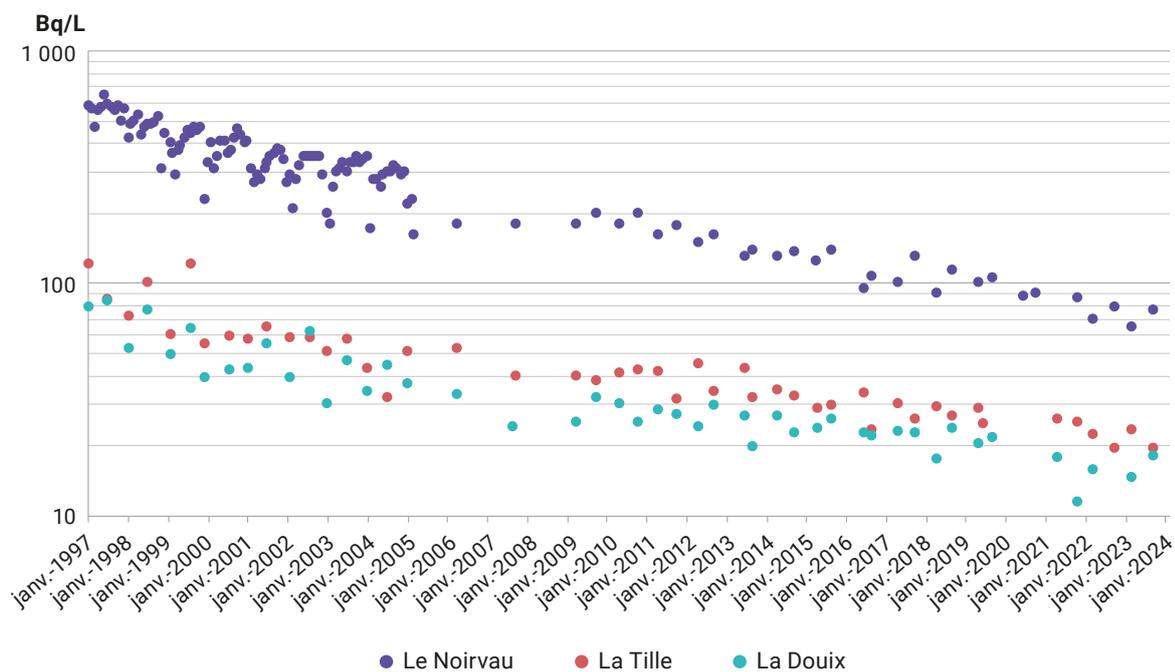


FIGURE 8 / ÉVOLUTION TEMPORELLE DE L'ACTIVITÉ DE TRITIUM DANS LES EAUX DE SURFACE (Bq/L) (données IRSN)



Évaluation de la dose moyenne à partir des mesures environnementales

Les voies d'exposition de la population au tritium présent dans l'environnement, considérées sont : l'ingestion de denrées et d'eau, l'inhalation et l'incorporation transcutanée. Hormis l'ingestion d'eau, les doses relatives à ces expositions sont calculées à partir de l'activité volumique moyenne de tritium dans la vapeur d'eau de l'air. Pour les autres radionucléides, l'influence du CEA de Valduc n'est pas observable dans l'environnement à partir des analyses effectuées dans le cadre de la surveillance réglementaire par l'exploitant et celle complémentaire de l'IRSN ; ils ne sont donc pas pris en compte.

Concernant les expositions par inhalation et transcutanée, il est considéré que l'individu séjourne 100 % de son temps sur les communes d'Échalot ou de Salives, sous l'influence d'une atmosphère à l'activité moyenne indiquée dans le tableau 2 en vapeur d'eau tritiée (HTO) ; le tritium sous la forme gazeuse n'a pas été pris en compte dans le calcul du fait du trop faible nombre de détection sur la période étudiée. Les doses ainsi estimées sont de 0,074 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour la commune d'Échalot et 0,044 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour la commune de Salives (elles étaient de 0,22 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour Échalot et 0,07 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour Salives sur la période précédente).

À l'instar de l'hypothèse pénalisante prise pour le calcul de dose par les voies d'inhalation et transcutanée, il a été considéré la consommation de l'eau de la source de Prégelan qui présente les activités de tritium les plus élevées et une moyenne de 37,9 Bq/L sur la période 2021-2023. La dose estimée est de 0,49 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (le piézomètre suivi par le CEA à proximité du ruisseau du Noirvau qui présente les activités de tritium les plus élevées n'a pas été pris en compte car l'eau n'est pas directement accessible au public).

Concernant l'ingestion de denrées produites localement, il a été considéré un régime de consommation de base sur la France entière, pour les zones rurales. La dose obtenue est de l'ordre de 0,13 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour Échalot et 0,08 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour Salives.

La dose moyenne totale liée aux rejets tritiés du site se situe donc autour de 0,8 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour la commune d'Échalot (figure 9 avec les contributions des voies d'exposition).

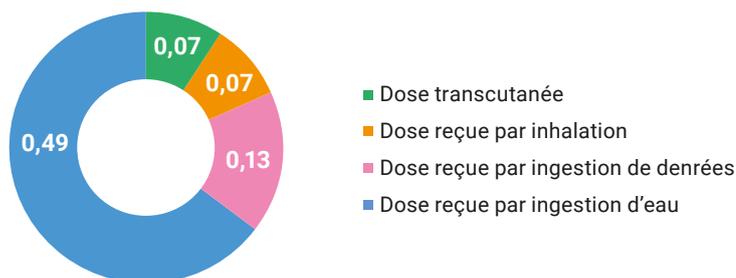
Conclusion

Les résultats des mesures effectuées dans tous les compartiments de l'environnement autour du site de Valduc montrent que le tritium marque l'environnement au-delà de 10 kilomètres du site. Les activités de tritium dans les différents compartiments de l'environnement restent d'une façon générale 10 à 100 fois supérieurs au bruit de fond.

L'activité des autres radionucléides ne permet pas de déceler une éventuelle contribution des rejets actuels du CEA. La présence d'uranium-236 dans les sédiments prélevés depuis 2021 témoigne de l'influence persistante d'activités passées.

Les rejets du CEA de Valduc pourraient conduire en moyenne à une dose efficace de 0,8 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour une personne adulte séjournant une année entière dans l'environnement proche du site et consommant pour partie de l'eau et des denrées locales. Cette estimation est du même ordre de grandeur que celle calculée lors du précédent bilan radiologique et plus de 1 000 fois inférieure à la limite d'exposition recommandée pour le public à 1 mSv/an.

FIGURE 9 / ESTIMATION DES DOSES LIÉES AUX REJETS ATMOSPHÉRIQUES DE TRITIUM DU SITE DE VALDUC : CONTRIBUTION DES VOIES D'ATTEINTE À LA DOSE EFFICACE TOTALE ($\mu\text{Sv}/\text{an}$)



2.5. LES BASES NAVALES NUCLÉAIRES

Description

En 2023, la Marine nationale exploitait douze chaufferies nucléaires embarquées sur différents bâtiments à propulsion nucléaire, également appelées systèmes nucléaires militaires (SNM) :

- le porte-avions « Charles de Gaulle » (PACdG), équipé de deux chaufferies nucléaires,
- quatre sous-marins nucléaires d'attaque (SNA) de type « Rubis », équipés d'une chaufferie nucléaire de type K48, retirés progressivement du service actif (deux ont déjà été retirés du service avant 2023) ;
- les deux premiers SNA de type « Suffren » (quatre autres sont en cours de construction) ;
- les quatre sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) de deuxième génération, équipés d'une chaufferie nucléaire de type K15.

Les quatre bases navales nucléaires situées en métropole sont chargées de l'accueil, du soutien logistique et de l'entretien de ces bâtiments nucléaires, incluant leurs chaufferies, lorsqu'ils y sont stationnés ou de passage (figure 1). Sur ces sites, les chaufferies nucléaires des sous-marins ou du porte-avions sont toujours à l'arrêt ou à très faible puissance. Ces sites présentent la particularité d'être installés au sein de grandes agglomérations que sont Toulon, Brest et Cherbourg.

Port militaire de Toulon

Le port militaire de Toulon (Var) est la principale base navale française (figure 2). En effet, il abrite 70 % de la flotte française, dont sept bâtiments à propulsion nucléaire : les six SNA et le PACdG. La base navale de Toulon comprend la zone « Missiessy » dédiée à l'accueil et aux opérations d'entretien des SNA. Cette installation rassemble trois bassins, des quais, des installations de support terrestre (station de pompage, moyens de manutention, de réfrigération, de ventilation, de fourniture en électricité et fluides divers...) et des ateliers pour l'entretien des chaufferies nucléaires dont une piscine d'entreposage d'éléments combustibles neufs (ECN) et irradiés (ECI). La zone du « grand bassin Vauban Sud-Ouest » (GBVSO) et ses installations de support terrestre sont, quant à elles, dédiées aux opérations d'entretien du PACdG.

FIGURE 1 / MISE EN CALE SÈCHE D'UN SOUS-MARIN NUCLÉAIRE LANCEUR D'ENGIN (SNLE)



© Marine nationale

FIGURE 2 / BASE NAVALE DE TOULON



Port militaire de Brest et base opérationnelle de l'Île Longue

Premier port militaire de la façade atlantique, le port de Brest (Finistère) est un site d'entretien et d'escale des bâtiments militaires français à propulsion nucléaire tels que les SNLE et les SNA. Il abrite le bassin n° 8 qui assure les opérations d'entretien des SNLE et SNA dont certaines maintenances sur les chaufferies nucléaires et l'installation du bassin n° 10 pour le recueil, l'entreposage et le traitement des effluents liquides et gazeux provenant des chaufferies.

La base opérationnelle de l'Île Longue, au sud de la base navale de Brest, est le site d'accueil et d'entretien courant des SNLE, composante océanique stratégique de la dissuasion. L'embarquement de leurs missiles stratégiques est effectué sur ce site. Certaines phases de l'entretien des chaufferies des SNLE sont par ailleurs réalisées au sein des installations de la zone « bassins » qui comprend une piscine de stockage du combustible. La base opérationnelle de l'Île Longue accueille également la station de traitement des effluents de la propulsion navale (STEP).

Port militaire de Cherbourg

Le port militaire de Cherbourg (Manche), avec les établissements de la DGA (Direction générale de l'armement) en son sein, est principalement dédié à la construction et au démantèlement de sous-marins à propulsion nucléaire (SNA et SNLE). Le port de Cherbourg abrite ainsi deux installations nucléaires situées respectivement dans la zone « Cachin-Laubeuf », dédiée à la construction, et dans la zone « Homet », dédiée au démantèlement des sous-marins retirés du service actif.

La base navale de Cherbourg peut par ailleurs accueillir des bâtiments et des sous-marins à propulsion nucléaire au mouillage comme à quai.

Les rejets radioactifs

Les activités de maintien en condition opérationnelle des navires à propulsion nucléaire et la conduite des travaux d'entretien majeurs des chaufferies peuvent conduire à des rejets radioactifs autorisés.

Les principaux radionucléides artificiels susceptibles d'être présents dans ces rejets sont des gaz rares (krypton-85, xénon-133, xénon-135), le tritium, le carbone-14 et des émetteurs gamma tels que le cobalt-60, le césium-137 et le césium-134.

La surveillance radiologique de l'environnement

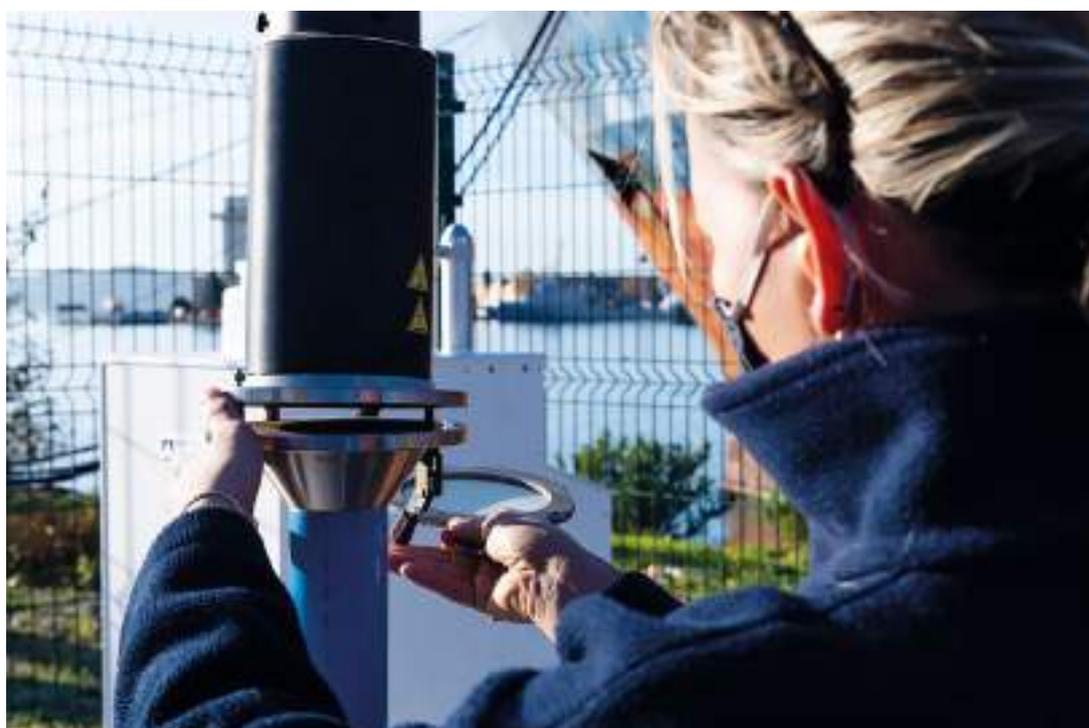
Afin d'assurer la surveillance radiologique des sites, les laboratoires d'analyses, de surveillance et d'expertise de la Marine (LASEM) de chaque base navale ainsi que l'IRSN réalisent des prélèvements selon un plan de surveillance défini en fonction des rejets, de l'environnement et des particularités des installations (tableau 1, figure 4).

Sur chaque site, la surveillance du compartiment atmosphérique est assurée grâce à des mesures en continu de débit de dose gamma ambiant via le système de surveillance nucléaire de la Marine (2SNM) et le réseau Téléray de l'IRSN, ainsi que par des prélèvements d'air (figure 3) et d'eau de pluie.

La surveillance des ports militaires est également assurée au travers de nombreux prélèvements périodiques dans le compartiment aquatique (eau de mer, sédiments, sables, crustacés, mollusques, poissons, algues) sur lesquels des mesures de l'activité bêta global, de tritium et par spectrométrie gamma sont réalisées.

Dans le compartiment terrestre, des prélèvements de végétaux (herbe, feuilles d'arbres) et des principales productions agricoles (fruits, légumes) sont réalisés sous les vents dominants, et complétés par des prélèvements de la couche superficielle des sols. Ces prélèvements terrestres font généralement l'objet d'une mesure par spectrométrie gamma ainsi que d'une mesure de tritium et de carbone-14 pour les végétaux.

FIGURE 3 / PRÉLÈVEMENTS AÉROSOLS ATMOSPHÉRIQUES À TOULON



© Marine nationale

TABLEAU 1 / PLAN DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE TOULON EFFECTUÉ PAR LA MARINE NATIONALE ET L'IRSN

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Marine nationale	IRSN
Débit de dose gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> 10 balises à l'intérieur du site, 3 balises à l'extérieur du site au fort de la Croix Faron, fort du Cap brun et au fort de l'Éguillette 	<ul style="list-style-type: none"> 10 balises dans l'environnement : Toulon, Saint-Cyr-sur-Mer, Pierrefeu-du-Var, Hyères, La Farlède, La Seyne-sur-Mer, Le Beausset, Arsenal de Toulon (Brigade de surveillance du littoral), La Roquebrussanne, La Valette-du-Var
Gaz rares et aérosols atmosphériques	<ul style="list-style-type: none"> Mesure différée : 3 points de prélèvement sur site : activité β globale sur filtre (quotidienne), spectrométrie γ, si β global > 2 mBq/m³ à J5, et spectrométrie γ sur regroupement des filtres quotidiens (mensuelle) 1 point de prélèvement sur site : tritium dans l'air HTO - HT (hebdomadaire) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement à la Seyne-sur-Mer : spectrométrie γ (hebdomadaire)
Eau de pluie	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement sur site : activité β globale, tritium et spectrométrie γ (à chaque occurrence) 	
Eau douce	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement eau de surface : le Revest (barrage de Dardennes) : activité β globale, tritium et spectrométrie γ (mensuelles) 1 point de prélèvement eau de la nappe : station de pompage Rodeilhac : activité β globale, tritium et spectrométrie γ (mensuelles) 	
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement Toulon ouest : base navale colline BVO et Toulon est, fort Lamalgue : spectrométrie γ (annuelle) 	
Eau de mer	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvement en surface : Milhaud ouest, barrage de Missiessy nord, petite rade Tour Royale et quai Vauban soutien PACdG : spectrométrie γ et tritium (trimestrielles) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement, Tour Royale : tritium (mensuelle), spectrométrie γ (annuelle)
Sédiments	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement, Tour Royale : spectrométrie γ (annuelle)
Faune aquatique	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement, Tour Royale : <ul style="list-style-type: none"> - moules : spectrométrie γ, Pu, Am, carbone-14, tritium lié (annuelles) - poissons : spectrométrie γ, Pu, Am, carbone-14, tritium lié (annuelles)
Herbes et/ou végétaux	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvement de graminées* : Toulon ouest, colline Malbousquet, Toulon est, fort Lamalgue, barrage de Dardennes : spectrométrie γ (mensuelle), tritium (eau de distillation) et carbone-14 (annuelles) 	
Fruits et légumes	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement, Toulon ouest et Toulon est : 4 espèces de légumes prélevées : <ul style="list-style-type: none"> - salade : spectrométrie γ (trimestriel), tritium libre et carbone-14 (annuelles) - pomme de terre, courgette, tomate : spectrométrie γ (annuelle) - jus de raisin issu de productions viticoles : spectrométrie γ (annuelle). 	

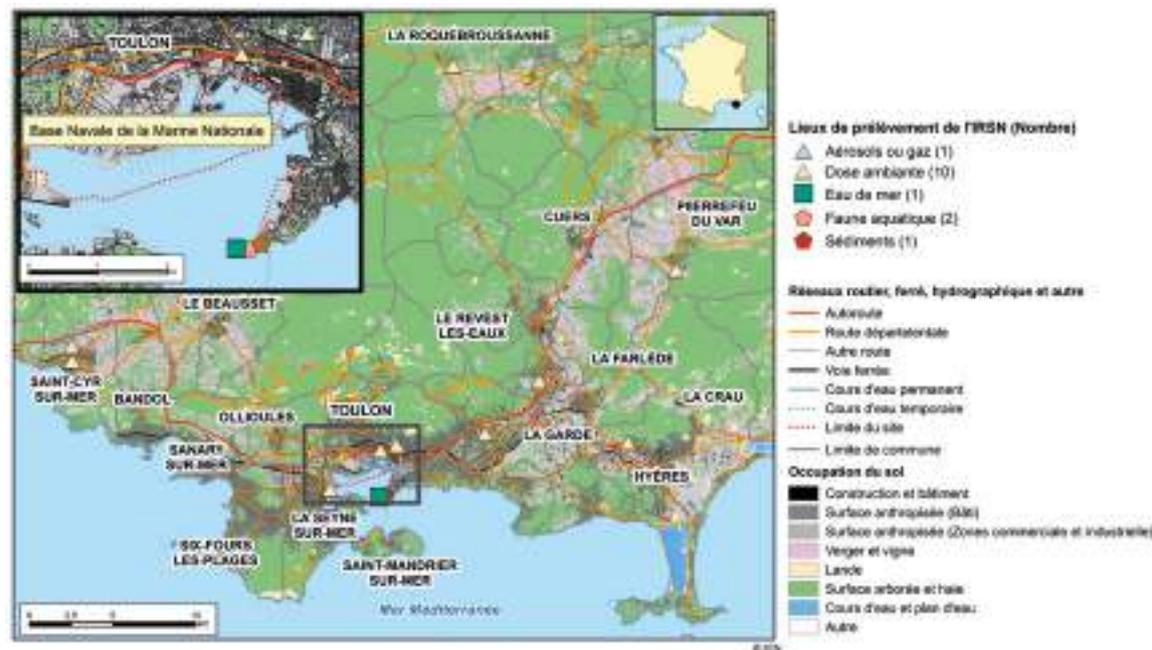
* Si absence de ressource, utilisation de lentisque ou cyprès au même point de prélèvement

FIGURE 4 / PLAN DE SURVEILLANCE DU SITE DE TOULON DE LA MARINE NATIONALE (4A) ET DE L'IRSN (4B)

4A



4B



Influence des sites sur l'environnement

Port militaire de Cherbourg

Le tritium

La situation radiologique de l'environnement du port militaire de Cherbourg, sous influence des rejets du site de La Hague (chapitre 2.3), revêt une complexité dans l'analyse des données et la discrimination de l'origine des radionucléides artificiels quantifiés, notamment pour le tritium, présent dans les rejets de ces deux sites, à des ordres de grandeur très différents.

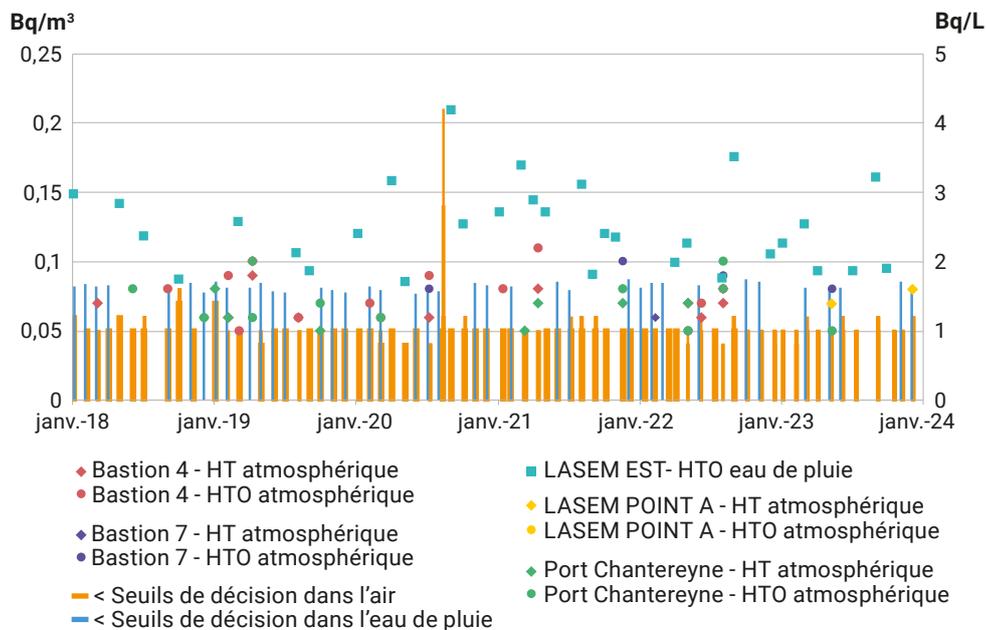
Dans le compartiment atmosphérique, la surveillance du tritium est réalisée *via* des prélèvements d'air effectués en continu à l'aide de barboteurs et analysés à une fréquence hebdomadaire en trois points autour du site. Le seuil de décision de la Marine nationale, de 0,05 Bq/m³, qui répond aux objectifs réglementaires, est supérieur d'un facteur 2-3 à la valeur maximum de la gamme du bruit de fond (2021-2023) allant de

0,003 à 0,018 Bq/m³ pour le HTO. Il ne permet pas d'estimer une activité ajoutée par le site. De plus le taux de détection d'activités supérieures aux seuils de décision métrologiques pour la période 2021-2023, similaire à celui évalué pour la période précédente (12 % contre 15 %), ne permet pas de calculer une moyenne d'activité de tritium dans l'air (figure 5).

Dans l'eau de pluie, les activités volumiques de tritium sont comprises entre 1,8 et 3,5 Bq/L, pour une moyenne de 2,5 Bq/L supérieure à la moyenne du bruit de fond estimée à 0,8 Bq/L. Les activités sont proches de celles observées sur la période précédente.

Ces activités sont cohérentes avec celles mesurées dans le compartiment terrestre, où l'on observe des activités massiques pour les végétaux (légumes, herbes, ajonc) comprises entre 1,06 et 3,94 Bq/kg frais, se trouvant dans le haut de la gamme du bruit de fond (de ≈ 0,3 à 1,8 Bq/kg frais pour les légumes feuilles), voire légèrement supérieur à celui-ci. Le lait a fait l'objet d'une seule détection significative de 1,81 Bq/L, en 2022.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM HT ET HTO DANS L'AIR (Bq/m³) ET HTO DANS L'EAU DE PLUIE (Bq/L) À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE CHERBOURG ENTRE 2018 ET 2023



La figure 6 illustre les résultats de tritium dans les différentes eaux prélevées dans le cadre de la surveillance du site : l'eau de mer prélevée dans la rade et aux alentours, l'eau saumâtre de la nappe située sous la zone du Homet et l'eau de la Divette, cours d'eau se jetant dans la petite rade de Cherbourg.

Les activités de tritium dans l'eau de mer, en différents points autour de la base navale, révèlent des activités variant entre 1,62 et 13 Bq/L (moyenne à 6,7 Bq/L) pour ces trois dernières années, toujours significatives et très supérieures au niveau de référence se situant, pour cette matrice, entre 0,1 et 0,2 Bq/L. Ces activités sont cohérentes avec celles observées tout le long de la côte depuis le site de La Hague et ne peuvent de ce fait en être distinguées. Le marquage par l'eau de mer des eaux saumâtres de la nappe du Homet au nord-est du site, n'a pas évolué depuis 2020 avec une moyenne de 3,36 Bq/L.

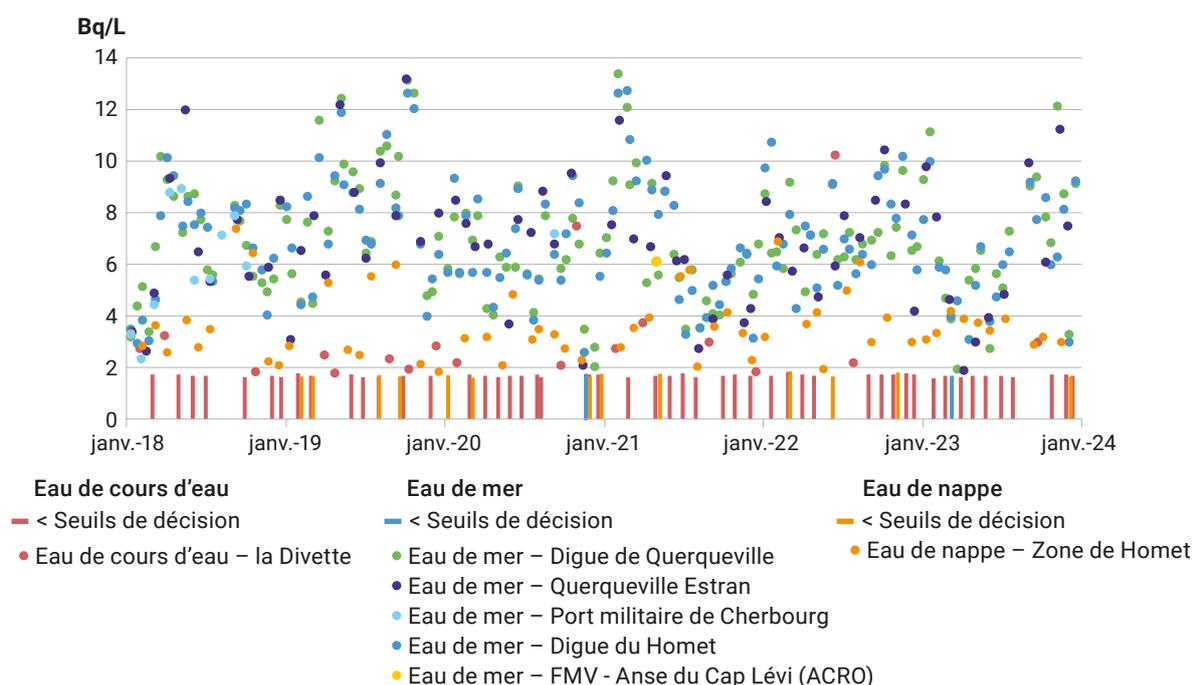
La Divette fait également l'objet d'une surveillance par prélèvements mensuels. Les résultats depuis 2021, dont 1/4 est supérieur au seuil de décision métrologique, montrent un très léger marquage avec des activités variant aux alentours de 2 Bq/L, supérieur à ce qui est observé dans les cours d'eau hors influence des installations nucléaires.

Ces activités sont imputables aux phénomènes des marées, à l'origine d'un mélange des eaux de mer (sous influence notamment des rejets de La Hague) et des eaux douces, de même manière que pour la nappe avec une valeur singulière de l'ordre de la dizaine de Bq/L mesurée sur un échantillon prélevé en 2022.

Présent dans le compartiment aquatique, le tritium est intégré aux organismes vivants, tels que les algues, les crustacés et les poissons. Les résultats obtenus sur ces matrices prélevées par la Marine nationale, compris entre 1,71 et 9 Bq/kg frais pour le tritium libre et entre 0,5 et 0,65 Bq/kg frais pour le tritium organiquement lié, confirment ce transfert.

Ainsi, le compartiment aquatique aux environs du port militaire de Cherbourg montre un marquage en tritium quelle que soit la matrice analysée. Il n'est cependant pas possible d'attribuer tout ou partie de ce marquage aux activités de ce site compte tenu des niveaux observés, légèrement inférieurs à ceux relevés au large du site industriel de La Hague dont l'influence est confirmée au-delà du port de Cherbourg.

FIGURE 6 / ACTIVITÉS DE TRITIUM LIBRE DANS LES EAUX DOUCES ET DE MER À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE CHERBOURG ENTRE 2018 ET 2023 (Bq/L)



Carbone-14

Dans le compartiment aquatique, les activités massiques de carbone-14 dans les deux poissons prélevés dans la rade de Cherbourg de 358 et 396 Bq/kg de carbone sont nettement supérieures au bruit de fond de ce radionucléide de 226 Bq/kg de carbone mais cohérentes avec celles observées le long de la côte sous l'influence de La Hague. Il en est de même pour les mollusques et les algues présentant les moyennes respectives de 370 et 355 Bq/kg de carbone.

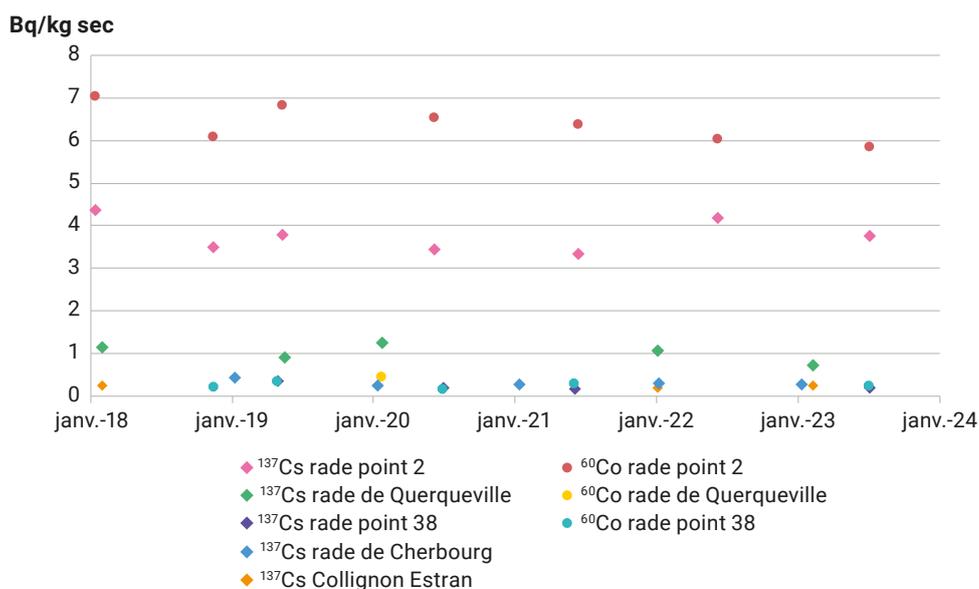
Aucun marquage de carbone-14 n'est mis en évidence dans le compartiment terrestre. Le résultat obtenu pour le lait, de 14,48 Bq/L, est proche de la valeur du bruit de fond (15 Bq/L), tout comme pour les légumes dont le résultat de l'échantillon de 2021 se trouve dans la gamme du bruit de fond (4,56 Bq/kg frais pour un bruit de fond inférieur à une dizaine de Bq/kg frais). Sur les herbes et les ajoncs les résultats sont respectivement de 114 et 105 Bq/kg sec.

Émetteurs gamma

Le césium-137 est quantifié dans le compartiment terrestre à hauteur du bruit de fond issu de la rémanence des retombées anciennes (des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl), que ce soit dans les sols (de 0,37 à 5,44 Bq/kg sec avec 100 % de valeurs significatives), l'herbe (0,06 à 1,4 Bq/kg sec pour 50 % de valeurs significatives) ou les légumes (0,013 et 0,024 Bq/kg frais) pour lesquels le césium-137 n'a été quantifié que 2 fois sur les 48 échantillons analysés (4 %).

Comme pour la période précédente, dans le compartiment marin, l'eau de mer, les algues, les poissons et les mollusques présentent des activités de césium-137 proches du bruit de fond. Il en est de même pour les sédiments, pour lesquels il est toujours quantifié avec des activités se situant entre 0,2 et 1,2 Bq/kg sec à l'exception du point 2 positionné dans la grande rade de Cherbourg, proche de la digue de Querqueville, zone d'accumulation sédimentaire, pour laquelle les valeurs oscillent autour de 4 Bq/kg sec et ce depuis le début de son suivi en 2018, comme l'illustre le graphique de la figure 7.

FIGURE 7 / ACTIVITÉS DE CÉSIMUM-137 ET DE COBALT-60 DANS LES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE CHERBOURG ENTRE 2018 ET 2023 (Bq/kg sec)



En ce même point de la rade, du ruthénium-106, que l'on retrouve également dans le spectre des rejets liquides de l'usine de La Hague, a fait l'objet de deux mesures significatives dans les sédiments (2,65 et 3,91 Bq/kg sec).

Le cobalt-60 est quantifié dans la moitié des échantillons de sédiments prélevés entre 2021 et 2023 autour de la base navale avec des activités variant faiblement autour de 0,2 Bq/kg sec. Ces activités sont attribuables aux rejets liquides d'Orano La Hague par la conduite en mer qui ont contribué à un marquage des sédiments au cours du temps en mer de la Manche. Toutefois, comme pour le césium-137, des activités bien plus élevées sont observées, de l'ordre de 6 à 7 Bq/kg sec dans la grande rade de Cherbourg.

Afin de rechercher l'origine de ces activités singulières, l'IRSN et Orano ont réalisé une étude sur l'historique des apports distaux des radionucléides dans les sédiments au niveau de deux zones d'accumulations sédimentaires que sont la rade de Cherbourg en Cotentin et la baie du Mont-Saint-Michel (rapport du projet TASE, Historique des apports distaux des radionucléides liés aux sédiments à l'ouest du Cotentin, rapport IRSN 2023-00516). L'analyse de carottes de sédiments prélevées en octobre 2016 par la Marine nationale dans la rade de Cherbourg a révélé des pics d'activités importants dans les années 1983-1984. Ceux-ci sont particulièrement observables pour le césium-137 qui présente des activités non compatibles avec les rejets réalisés par la conduite de rejets liquides en mer du site d'Orano La Hague. L'hypothèse la plus probable pour expliquer ces activités de césium-137 correspondrait à une dispersion des effluents lors de la rupture de cette même conduite en fin 1979. *A contrario*, le pic de cobalt-60 observé sur les carottes et daté de 1990 est cohérent avec le pic de rejet de cobalt-60 de 1985. C'est le reliquat de ce même pic qui est à l'origine des activités plus importantes observées encore aujourd'hui dans la rade.

Le cobalt-60 est également quantifié dans les algues dans plus de deux cas sur trois (0,21 à 0,99 Bq/kg sec) et une fois dans les deux mollusques prélevés sur la période (0,12 Bq/kg frais), les activités massiques étant du même ordre de grandeur que celles mesurées le long des côtes depuis le site de La Hague.

Provenant essentiellement des usines de traitement de combustibles usés de La Hague et de Sellafield, l'iode-129 est systématiquement quantifié dans les prélèvements d'algues, indicateurs biologiques sensibles, avec des activités comprises entre 17,3 et 58 Bq/kg sec, cohérentes avec celles mesurées tout au long du littoral marin depuis le site de La Hague. Il est également quantifié dans les poissons par trois fois sur les 17 échantillons prélevés (de 0,06 à 0,4 Bq/kg frais) et deux fois dans des sédiments (2,56 et 4,24 Bq/kg sec).

Enfin, par cinq fois de l'iode-131 a été mesuré au-dessus du seuil de décision dans des algues pour ces trois dernières années (0,5 et 3,7 Bq/kg sec). Ce radionucléide, utilisé dans le cadre de diagnostic ou de traitement médicaux, peut être imputable, dans le compartiment aquatique, aux émissaires hospitaliers transitant par les usines de traitement des eaux.

Les plutoniums-238, 239+240 et l'américium-241

Pour l'ensemble des matrices du compartiment aquatique, les plutoniums et l'américium sont quantifiés par l'IRSN dans 62 % des cas.

La quantification concomitante des isotopes 238 et 239+240 du plutonium permet le calcul du rapport des activités des $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$. Celui-ci, supérieur à 0,2, toutes matrices confondues, permet de confirmer, comme pour la période précédente, une origine industrielle imputable aux rejets liquides du site d'Orano La Hague. Comme pour la période précédente l'américium-241 est toujours quantifié dans les sédiments avec des activités comprises entre 0,17 et 0,45 Bq/kg sec, autour de 0,01 Bq/kg frais dans les mollusques, de 0,022 Bq/kg sec pour les algues et de 0,033 Bq/kg frais dans un poisson pêché dans la rade.

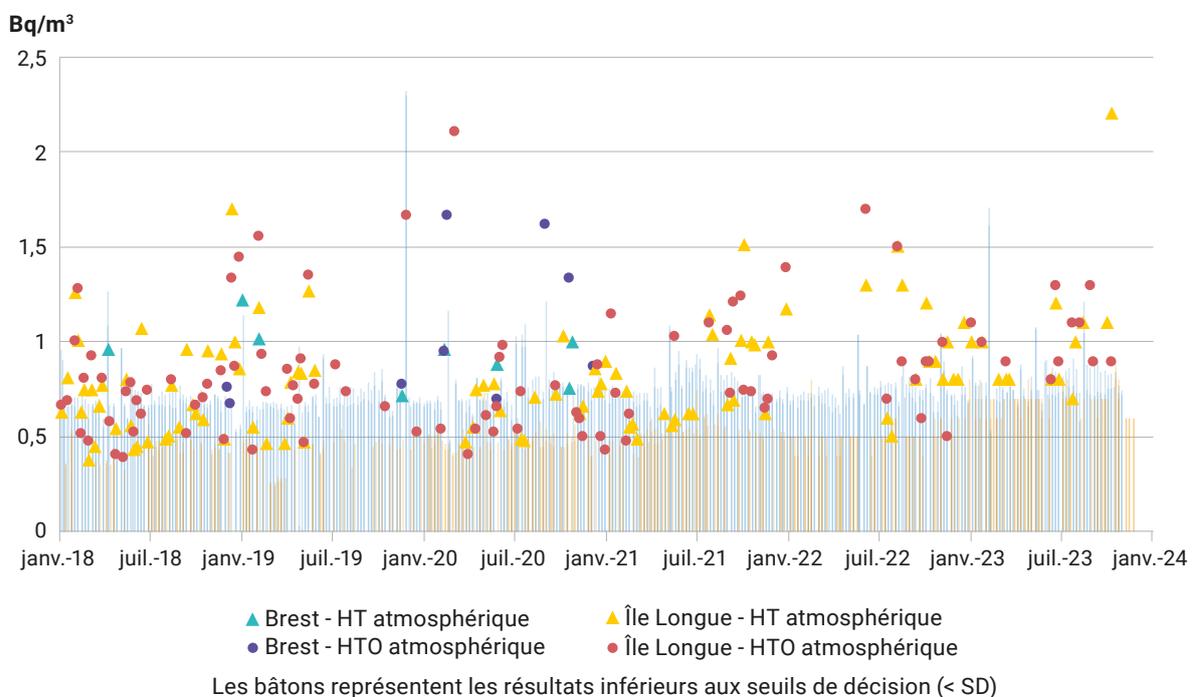
Port militaire de Brest et base opérationnelle de l'Île Longue

Le tritium

Dans le compartiment atmosphérique, le tritium est prélevé par barbotage en deux points, à proximité de la base de Brest et du site de l'île Longue, sous les deux formes présentes dans l'air : vapeur d'eau tritiée, forme prédominante, et le tritium gazeux. Le seuil de décision de la Marine nationale, de 0,05 Bq/m³ en moyenne, qui répond aux objectifs réglementaires, est néanmoins supérieur d'un facteur 2-3 à la valeur maximum de la gamme du bruit de fond allant de 0,003 à 0,018 Bq/m³ pour le tritium HTO. Il ne permet pas de quantifier la contribution du tritium issu des rejets atmosphériques du site par rapport au bruit de fond. Les activités significatives, uniquement issues de la surveillance du site de l'île Longue, ne représentent que 20 % des résultats et ne permettent pas de calculer une activité moyenne dans l'air au niveau du site sur la période

2021-2023. Néanmoins, les activités quantifiées au-dessus des seuils de décisions, comprises entre 0,025 et 0,246 Bq/m³ sont nettement supérieures au bruit de fond, et témoignent des rejets atmosphériques des installations du site (figure 8). Dans les eaux de pluie prélevées à proximité de la base de Brest, la seule activité significative de tritium, de 3,64 Bq/L, est supérieure à la valeur maximale de la gamme du bruit de fond de 1,8 Bq/L, activité proche du seuil de décision de la Marine d'environ 2,2 Bq/L pour cette matrice. Pour le site de l'île Longue, sur la période 2021-2023, 40 % des activités mesurées sur l'eau de pluie sont significatives avec des variations comprises entre 1,5 et 4,45 Bq/L, au-delà de l'activité moyenne du bruit de fond de 0,8 Bq/L. Les valeurs observées sur le site de l'île Longue sont légèrement supérieures à celles de la période précédente, alors que les mesures obtenues dans l'environnement du site de Brest montrent que l'influence des rejets n'est quasiment plus perceptible ces six dernières années.

FIGURE 8 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM HT ET HTO DANS L'AIR (Bq/m³) À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE BREST ET DE LA BASE OPÉRATIONNELLE DE L'ÎLE LONGUE ENTRE 2018 ET 2023

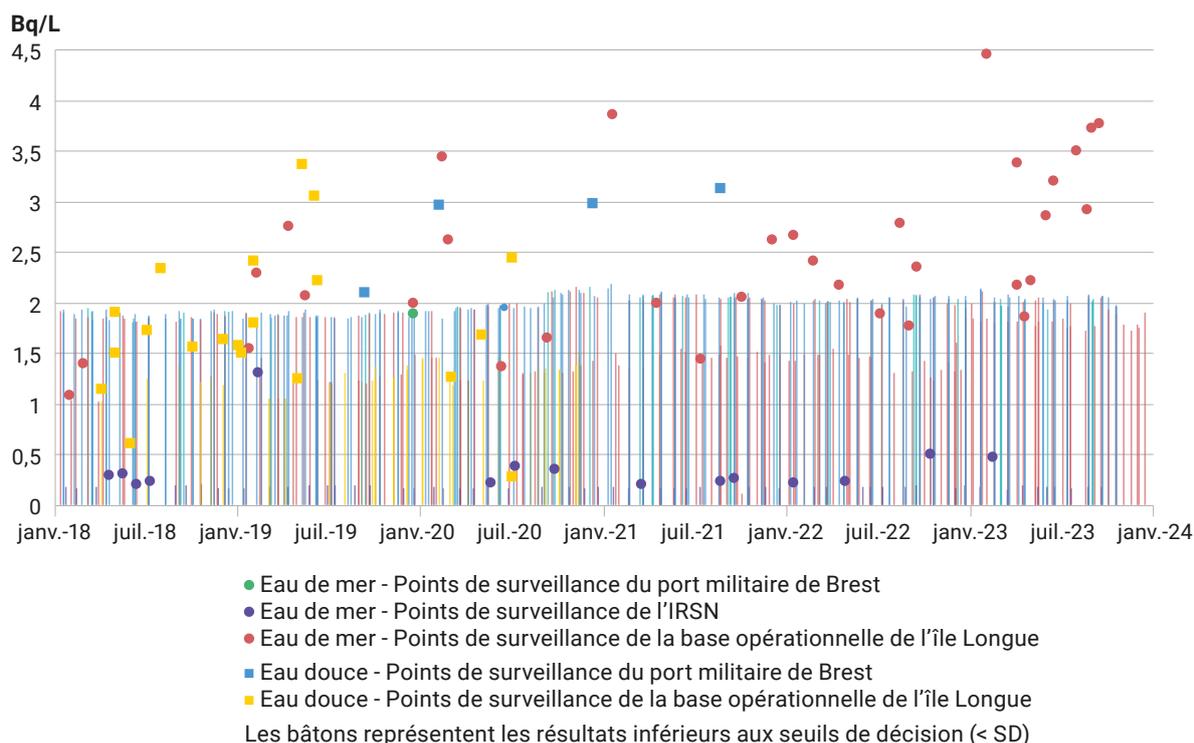


Malgré des activités de tritium dans l'air dépassant le bruit de fond au niveau de l'île Longue, aucun marquage significatif du compartiment terrestre n'est observé dans les prélèvements réalisés autour du site. En effet, les rejets réalisés au niveau de la presqu'île sont dilués par les vents avant d'atteindre les terres. De ce fait entre 2021 et 2023, aucun prélèvement réalisé par la Marine nationale ne présente un résultat significatif de tritium libre dans les matrices du compartiment terrestre telles que le lait ou les végétaux (herbes, ajonc et légumes). En 2022, lors d'une campagne ponctuelle, l'IRSN a réalisé une quinzaine de prélèvements de feuilles de chênes dans l'environnement des deux sites, les activités évoluent entre 0,8 et 2,1 Bq/L pour le tritium organiquement lié et entre le seuil de décision (0,16 Bq/L) et 1,35 Bq/L pour le tritium libre. Ces activités sont majoritairement comprises dans la gamme de bruit de fond (0,3 à 1,8 Bq/L) et confirment l'observation faite précédemment.

Entre 2021 et 2023, les activités de tritium dans l'eau de mer mesurées par la Marine nationale, dans le cadre de la surveillance du site de l'île Longue, oscillent du seuil de décision de 1,44 Bq/L à une valeur significative maximale de 2,78 Bq/L, niveau légèrement supérieur

à celui de la période précédente, avec un pourcentage de valeurs au-delà du seuil de décision de 14 %. Cela témoigne, au plus proche du site, d'activités volumiques ponctuellement très supérieures au bruit de fond radiologique qui est compris entre 0,1 et 0,2 Bq/L pour l'eau de mer. Lorsque l'on s'éloigne du site, mais toujours au niveau de l'anse du Fret, les mesures bas niveau réalisées à l'IRSN permettent d'obtenir des activités comprises entre un seuil de décision de l'ordre de 0,2 Bq/L et 0,5 Bq/L, valeur maximale observée, avec un pourcentage de 22 % de valeurs significatives. Ces activités semblent montrer que l'influence des rejets du site est rapidement atténuée par dilution dans les eaux de la rade. Par ailleurs, sur l'ensemble des prélèvements d'eau de mer réalisés dans la rade de Brest par la Marine nationale dans le cadre de la surveillance de la base de Brest, seul un résultat de 3,86 Bq/L dépasse le seuil de décision métrologique d'environ 2 Bq/L (figure 9). Les activités massiques de tritium organiquement lié mesurées entre 2021 et 2023 dans les algues brunes prélevées dans l'anse du Fret (0,084 et 0,194 Bq/kg frais) sont légèrement supérieures à celles mesurées par l'IRSN à la station atlantique hors influence à Concarneau (0,0262 et 0,0427 Bq/kg frais).

FIGURE 9 / ACTIVITÉS DE TRITIUM LIBRE DANS L'EAU DE MER ET DANS L'EAU DOUCE (Bq/L) À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE BREST ET DE LA BASE OPÉRATIONNELLE DE L'ÎLE LONGUE ENTRE 2018 ET 2023



Les activités de tritium observées dans l'eau douce sur cette période sont comparables aux données de la période 2018-2020 avec seulement une valeur significative de 3,3 Bq/L quantifiée pour le site de Brest (sur 68 mesures réalisées), activité au-dessus du bruit de fond estimé à 0,8 Bq/L pour cette matrice. Pour l'île Longue, on observe 26 % de valeurs significatives sur les 60 prélèvements analysés, variant autour de 2 Bq/L, légèrement au-dessus du bruit de fond également.

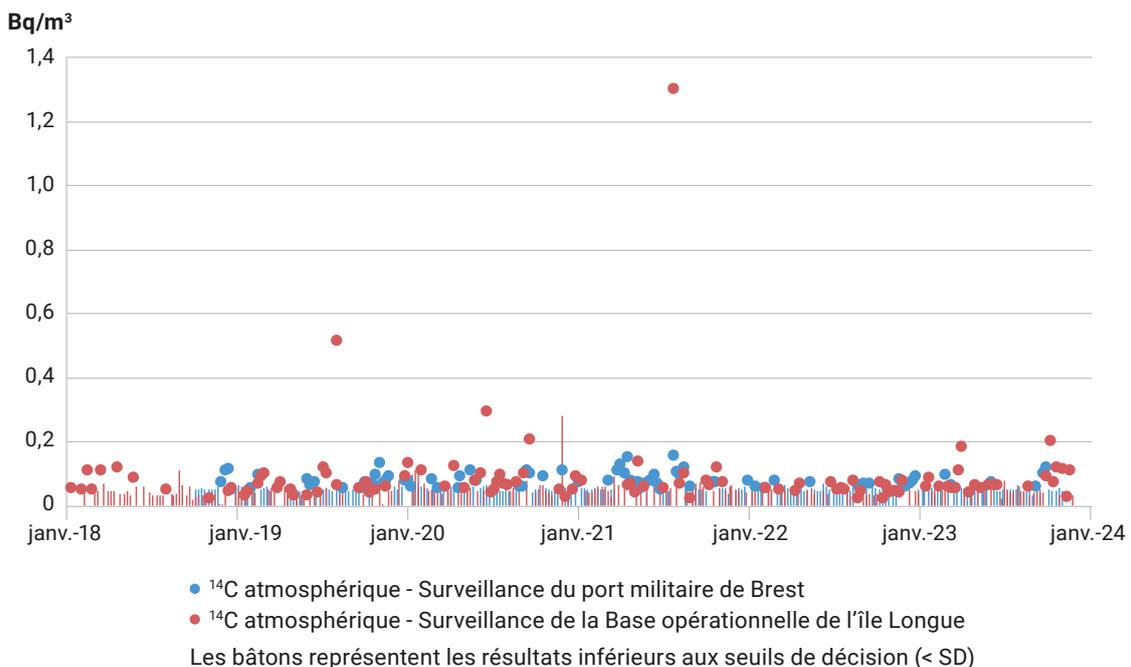
Carbone-14

L'activité volumique de carbone-14 dans l'air prélevé en clôture des sites de Brest et de l'île Longue, est très régulièrement au-dessus du bruit de fond de ce radionucléide dans l'air qui est évalué à 0,045 Bq/m³ (figure 10). Pour la période 2021-2023, sur ces deux sites, le pourcentage de résultats dépassant le seuil de décision est respectivement de 30 et 41 % avec des activités se situant autour de 0,085 Bq/m³, soit deux fois le bruit de fond. Une activité singulière de 1,3 Bq/m³ a été détectée en juillet 2021 au point situé sous les vents dominants du site de l'île Longue.

Lors de l'étude ponctuelle réalisée en 2022 par l'IRSN, les résultats de carbone-14 dans les feuilles de chênes prélevées autour des sites de Brest et de l'île Longue n'ont pas mis en évidence de singularité, les activités se situant entre 223,6 et 226,1 Bq/kg de carbone, soit proche de la valeur de référence de 222± 7 Bq/kg de carbone. Ces résultats ramenés en Bq/kg sec (de 109 à 113 Bq/kg sec) sont cohérents avec ceux des mesures réalisées par la Marine nationale sur l'herbe et les ajoncs prélevés autour des sites, fluctuant entre 95 et 113 Bq/kg sec. Les moyennes des résultats obtenus dans le lait (15,8 Bq/L) et les salades (5,2 Bq/kg frais) sont également cohérentes avec les activités massiques estimées pour le bruit de fond radiologique (respectivement de 14 Bq/L et de 6 Bq/kg frais).

Dans le compartiment aquatique, les activités dans les algues entre 2021 et 2023 (72,15 et 94,4 Bq/kg sec) sont comparables à celles observées sur les prélèvements réalisés par l'IRSN le long de la côte atlantique à Concarneau (85,2 et 82 Bq/kg sec) sur la même période et identiques aux activités observées sur la période précédente.

FIGURE 10 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES EN CARBONE-14 DANS L'AIR (Bq/m³) À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE BREST ET DE LA BASE OPÉRATIONNELLE DE L'ÎLE LONGUE ENTRE 2018 ET 2023



Émetteurs gamma

Le césium-137 est l'un des seuls émetteurs gamma quantifié plus ou moins fréquemment selon le type de matrice échantillonnée.

Dans l'eau de mer, le césium-137 n'est quantifié que lorsqu'une grande quantité d'eau est prélevée et traitée par coprécipitation afin d'abaisser le seuil de décision, permettant ainsi d'obtenir un résultat significatif 7 fois sur 8. Les activités sont alors toujours proches de la moyenne observée le long de la côte atlantique, de l'ordre de 0,0008 Bq/L, attribuable aux retombées anciennes des essais nucléaires atmosphériques.

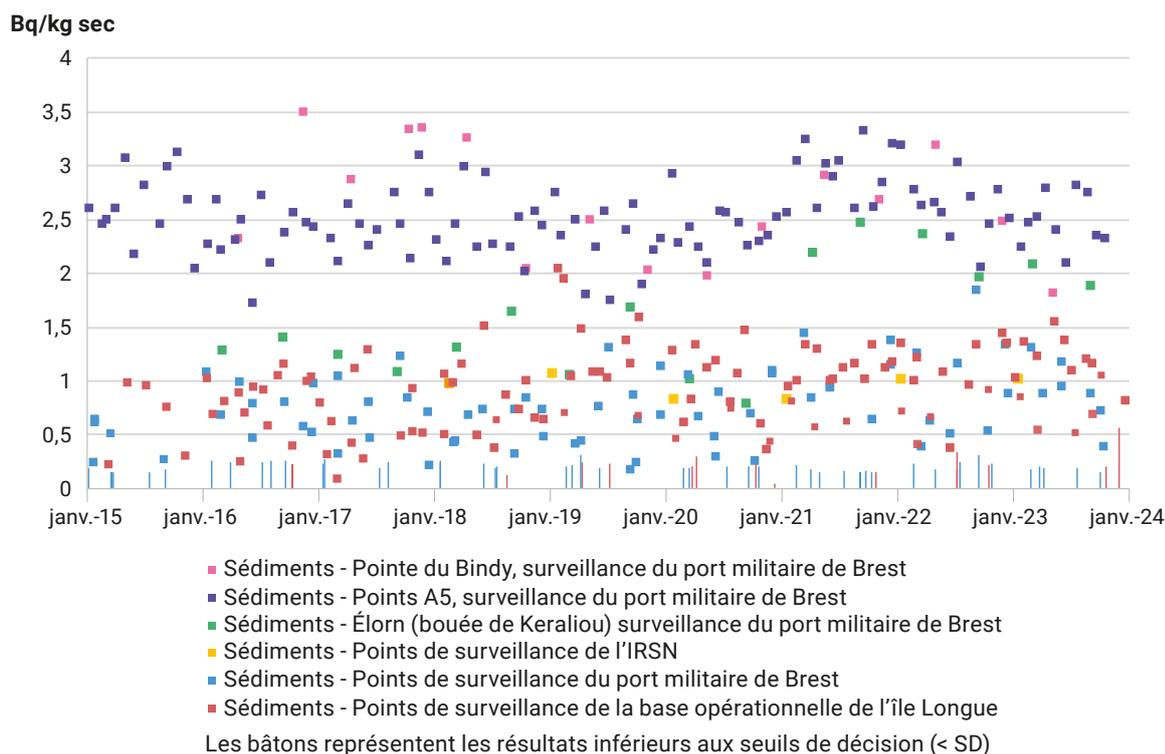
Comme observé sur la période précédente, les résultats de mesure obtenus lors de l'analyse des sédiments, matrice dont la capacité d'intégration est plus importante et dont le taux de détection de valeurs significatives est d'environ 83 %, présentent davantage de disparités : d'une part, des activités proches du bruit de fond du césium-137 dans cette matrice (1 Bq/kg sec), représentatives des retombées anciennes et, d'autre part, des activités 2 à 3 fois plus élevées, se situant entre 2 et 3,5 Bq/kg sec. Ces activités massives sont attribuables aux apports sédimentaires des cours d'eau à leurs embouchures également marqués par ces mêmes retombées anciennes.

Pour les poissons, les activités massives supérieures au seuil de décision représentent seulement trois détections sur 48 analyses entre 2021-2023, elles sont comprises entre 0,052 et 0,1 Bq/kg frais, et sont cohérentes avec les concentrations de césium-137 obtenues par l'IRSN sur la façade atlantique hors influence d'installations nucléaires et donc liées aux retombées anciennes. Toutes les analyses réalisées sur les algues sont restées en dessous des seuils de décision.

Pour le compartiment terrestre, les analyses de sols, bien que disparates (de 1,9 à 16,05 Bq/kg sec), sont comprises dans la gamme d'activités observée sur l'ouest de la France dont la moyenne est de l'ordre de 4,65 Bq/kg sec. Une seule activité significative a été quantifiée dans les matrices biologiques, sur un champignon, avec une activité de 0,039 Bq/kg frais, dans la limite basse des valeurs observées hors influence des installations nucléaires.

Le cobalt-60 a été quantifié par deux fois dans les sédiments prélevés dans le cadre de la surveillance de la base opérationnelle l'île Longue (0,51 et 1,7 Bq/kg sec). Ce radionucléide artificiel provient d'un marquage ancien par les rejets de ce même site.

FIGURE 11 / ACTIVITÉS DE CÉSIUM-137 DANS LES SÉDIMENTS (Bq/kg sec) À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE BREST ET DE LA BASE OPÉRATIONNELLE DE L'ÎLE LONGUE ENTRE 2015 ET 2023



Les plutoniums-238, 239+240

Seuls quelques prélèvements d'algues et de mollusques, réalisés par l'IRSN, ont fait l'objet d'analyses des isotopes du plutonium, permettant de mesurer des activités significatives pour le plutonium-239+240 dans les algues (0,027 à 0,043 Bq/kg sec). Ces activités sont cohérentes avec les gammes d'activités relevées hors influence d'installations nucléaires sur la façade atlantique comprises entre 0,026 et 0,044 Bq/kg sec.



© Marine nationale

Prélèvement de sédiments marins

Port militaire de Toulon

Le tritium

La surveillance du tritium dans les compartiments atmosphérique et terrestre à proximité de la base navale de Toulon comprend des prélèvements d'air par barbotage et d'eau de pluie pour le compartiment atmosphérique ainsi que de végétaux pour le compartiment terrestre.

Depuis 2021, seuls deux résultats significatifs ont été quantifiés sur les échantillons prélevés par le barboteur assigné à cette surveillance. Ces activités, de 0,098 Bq/m³ de HTO et 0,087 Bq/m³ de tritium gazeux, sont proches des seuils de décision mais nettement supérieures au bruit de fond compris entre 0,003 et 0,018 Bq/m³. Le seuil de décision de la Marine nationale, de 0,05 Bq/m³ en moyenne, qui répond aux objectifs réglementaires, ne permet pas de quantifier la contribution du tritium issu des rejets atmosphériques du site par rapport au bruit de fond.

Parallèlement, un seul échantillon d'eau de pluie présente un résultat significatif (3,88 ± 2,39 Bq/L) au-delà de la limite supérieure de la gamme du bruit de fond radiologique et du seuil de décision de la Marine nationale pour cette matrice d'environ 2 Bq/L.

Les résultats d'analyses de tritium libre dans les végétaux terrestres sont cohérents avec les observations précédentes. Ils sont majoritairement en dessous des seuils de décision (≈ 1,5 Bq/kg frais). Une seule activité significative a été quantifiée dans une herbe prélevée sous les vents dominants de la base (3,79 Bq/kg frais), cette activité est cohérente avec la détection de tritium gazeux de 0,087 Bq/m³ soulignée précédemment (début février 2023).

Dans l'eau de mer de la rade de Toulon, la Marine nationale ne relève aucune activité significative au-delà de son seuil de décision métrologique de 2 Bq/L pour le tritium. En réalisant des mesures plus performantes, l'IRSN arrive à quantifier le tritium à un niveau légèrement supérieur au bruit de fond hors influence des installations nucléaires compris entre 0,1 et 0,2 Bq/L pour l'eau de mer. Ces résultats dont 50 % dépassent les seuils de décisions, oscillent entre 0,19 à 0,53 Bq/L et sont ponctués de deux valeurs singulières à 1 et 1,12 Bq/L.

L'activité de 0,069 Bq/kg frais de tritium organiquement lié dans les algues en 2021 est dans la gamme supérieure des valeurs rencontrées sur la façade atlantique hors influence des installations nucléaires.

Carbone-14

Dans le compartiment terrestre, les prélèvements de salades présentent une moyenne d'activités massiques de carbone-14 de 6 Bq/kg frais, correspondant à la moyenne estimée pour le bruit de fond radiologique (6,2 Bq/kg frais ; 222 Bq/kg de carbone), tout comme l'herbe, dont l'activité massique moyenne de 100 Bq/kg sec, se trouve dans la partie haute de la gamme du bruit de fond pour cette matrice.

Ces observations se retrouvent également dans le compartiment aquatique. En effet, la moyenne des résultats pour les trois échantillons de moules prélevés dans la rade, de 13 Bq/kg frais, est dans la gamme du bruit de fond radiologique. Les activités dans les poissons prélevés dans la rade (229 à 239 Bq/kg de carbone) sont cohérentes avec celles observées par l'IRSN le long de la côte méditerranéenne dont les activités sont comprises entre 227 et 235 Bq/kg de carbone. Enfin l'activité dans le prélèvement d'algues en 2021 de 235 Bq/kg de carbone est inférieure aux valeurs observées sur la façade atlantique hors influence des installations nucléaires.

Émetteurs gamma

Parmi les émetteurs gamma mesurés dans l'environnement de la base navale de Toulon, seul le césium-137, rémanent des retombées anciennes, est quantifié, notamment dans les aérosols atmosphériques pour lesquels la moyenne de 0,155 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour la période 2021-2023, est proche de celle du bruit de fond estimé à 0,1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

Ces très faibles activités ne permettent plus de quantifier le césium-137 dans les matrices du compartiment terrestre prélevées dans le cadre de la surveillance du site à l'exception des sols dont les activités sont comprises entre 10,7 et 25,3 Bq/kg sec, proches des teneurs moyennes observées dans l'est de la France, comprises entre 5 et 18 Bq/kg sec.

Dans le compartiment aquatique des activités sont quantifiées dans les poissons et les mollusques, elles sont comprises entre 0,03 et 0,05 Bq/kg frais, et elles sont en moyenne de 0,4 Bq/kg sec dans les sédiments.

Tous ces résultats sont inclus dans les gammes d'activités de bruit de fond.

Les plutoniums-238, 239+240

Des analyses des différents isotopes du plutonium ont été réalisées par l'IRSN dans les mollusques et les poissons prélevés dans la rade de Toulon.

Pour les moules, les activités de plutonium-239+240 sont comprises entre 0,0025 et 0,013 Bq/kg frais, avec un taux de détection de 83 %, et sont incluses dans la gamme du bruit de fond radiologique.

Pour les poissons, les activités pour ces mêmes radionucléides sont plus faibles et plus éparses variant d'un facteur 100, de 0,000038 à 0,0068 Bq/kg frais, valeur maximale très supérieure à la moyenne de référence du bruit de fond qui est de l'ordre de 0,00001 Bq/kg frais. Ce prélèvement de poissons présentant une activité très élevée a été réalisé dans la petite rade, milieu semi-clos dans lequel les apports par les cours d'eau en plutonium hérité des retombées anciennes peuvent se concentrer. Ce résultat est par ailleurs comparable aux résultats obtenus sur les moules prélevées dans la même zone.

Les activités de plutonium-238 mesurées significativement dans les poissons et les mollusques sont proches de celles mesurées sur la période 2018-2020. Néanmoins, contrairement à la période précédente, le nombre de résultats inférieurs aux seuils de décision, ainsi que les fortes incertitudes métrologiques sur les résultats significatifs, ne permettent pas de calculer les rapports d'activités ($^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$).

2.6. SYNTHÈSE DOSIMÉTRIQUE

Sur les trente-sept sites français métropolitains où sont exploitées des installations nucléaires de base, vingt-neuf ont pu faire l'objet d'évaluations dosimétriques basées sur des résultats de mesures radiologiques dans leur environnement. Ces mesures ont été acquises sur la période 2021-2023, 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 résidant autour de ces sites et estimées à partir de mesures environnementales. Ce tableau permet également de comparer ces doses à celles estimées dans les *Bilans radiologiques* précédents.

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 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 Valduc ou de Grenoble. Cette exposition varie suivant la localisation (distance au site et azimut par rapport aux vents dominants) ; les doses indiquées correspondant souvent au cas le plus pénalisant (proximité immédiate et sous les vents dominants).

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 Valduc...) ne peuvent être reçues que par les personnes consommant ces denrées. Ces doses estimées sont alors proportionnelles aux quantités consommées.

À noter que dans le cas des CNPE, les doses par ingestion d'eau ou de poissons d'eau douce 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 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 sur lesquels sont implantées des INB peut être concernée, mais dans une moindre mesure, même si elle se trouve loin en aval.

Sur certains sites, des stockages de matières radioactives engendrent également un rayonnement susceptible d'entraîner une exposition de la population riveraine ou de personnes présentes occasionnellement en bordure de site.

Les doses susceptibles d'être reçues par la population résidant autour des installations nucléaires françaises et estimées à partir des résultats de mesures, sont très faibles. Ainsi, une personne qui résiderait autour d'un CNPE et qui cumulerait toutes les voies d'exposition (c'est-à-dire qui consommerait régulièrement des denrées produites localement, mangerait quelques kilogrammes de poissons pêchés en aval des rejets du site, et boirait 2 L/j d'eau du fleuve) recevrait une dose inférieure à $1\ \mu\text{Sv}/\text{an}$, c'est-à-dire moins du millième de la limite d'exposition du public fixée à $1\ \text{mSv}/\text{an}$ ($1\ 000\ \mu\text{Sv}/\text{an}$).

Un même cumul de voies d'exposition conduirait, autour de La Hague, à une dose de l'ordre de $9\ \mu\text{Sv}/\text{an}$, 550 fois inférieure à la dose moyenne reçue annuellement par la population française en dehors de toute influence d'une installation nucléaire, du fait du bruit de fond radiologique existant sur notre territoire.

Cependant, sur certains sites, des entreposages de matières radioactives peuvent engendrer un rayonnement susceptible d'entraîner une exposition plus importante de la population avoisinante selon les scénarios envisagés. C'est le cas par exemple du site de Malvési pour lequel les doses par exposition externe sont estimées entre quelques microsievverts et une centaine de microsievverts suivant le scénario considéré.

Ces doses sont en bon accord avec celles estimées par calcul (modélisation des transferts des radionucléides dans les différentes composantes de l'environnement jusqu'à l'Homme) par les exploitants des sites nucléaires, à partir du cumul des activités réellement rejetées⁽¹⁾. Une synthèse de ces calculs d'impact dosimétrique à partir des rejets réels des installations est présentée dans le rapport annuel de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France disponible sur www.asn.fr.

Contrairement aux estimations calculatoires effectuées 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. Cette estimation basée sur les mesures est toutefois représentative de la majeure partie de l'exposition potentielle totale tous radionucléides et voies d'exposition confondus. Ainsi, pour certains sites comme Valduc ou Grenoble, les doses dues au seul tritium, estimées à partir des mesures réalisées dans l'environnement, représentent l'essentiel de la dose totale calculée pour ces sites, toutes voies d'exposition et tous radionucléides considérés. Dans le cas de l'usine de retraitement Orano La Hague ou des CNPE d'EDF, les doses présentées dans le tableau 1 représentent plus de 70 % de cette dose totale potentiellement imputable au site.

La connaissance de la radioactivité dans l'environnement, fondée sur les différents programmes de surveillance de l'environnement des sites nucléaires français, permet donc d'estimer de manière réaliste l'essentiel des doses susceptibles d'être reçues par la population riveraine des installations. Réalisée avec une autre méthode que celle utilisée par les exploitants, 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. En effet, des études supplémentaires réalisées à l'initiative de l'IRSN, d'associations, de CLI ou de certains exploitants y contribuent également.

La synthèse des calculs réalisés montre que les doses estimées sur la période 2021-2023 sont très proches de celles relatives aux précédents bilans (2015-2017 et 2018-2020). Les fluctuations des doses, qui peuvent atteindre un facteur 2, sont liées notamment à la représentativité spatio-temporelle des échantillons environnementaux analysés.

Après les diminutions observées pour certains d'entre eux dans les *Bilans radiologiques* précédents, les rejets des sites nucléaires français sont maintenant assez constants depuis plusieurs années et engendrent des activités massiques ou volumiques dans l'environnement également assez constantes. On note toutefois le cas du site de Fessenheim dont les rejets et l'influence sur son environnement ont diminué à la suite de sa mise à l'arrêt en 2020.

Comme pour le bilan radiologique précédent, les doses n'ont pas pu être estimées autour de certains sites dont l'influence sur l'environnement est trop faible pour être quantifiable par la réalisation de mesures. Il s'agit des sites de la Marine nationale (Cherbourg, Toulon, Brest), de Fontenay-aux-Roses, de Brennilis, de Bruyères-le-Châtel, du Ganil et de Creys-Malville. Pour ces sites, les doses estimées par les exploitants par calcul sur la base du cumul des activités rejetées, toutes voies d'atteinte et radionucléides considérés, sont inférieures, voire très inférieures à 0,1 µSv/an (à l'exception du site de Cadarache pour lequel la dose estimée par le CEA est principalement due à l'émanation additionnelle de radon).

(1) En application de leurs obligations réglementaires (arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales applicables aux INB et décision de l'ASN n° 2013-DC-0360 du 16 juillet 2013 modifiée relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des INB).

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 ACQUISES AUTOUR DE CHACUN DE CES SITES. DOSES DUES À LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE EN FRANCE

Sites	BR 2011-2014	BR 2015-2017	BR 2018-2020	BR 2021-2023	Radionucléide et voies d'atteinte
	Dose ($\mu\text{Sv}/\text{an}$)				
La Hague	0,6 à 3,5	1,6 à 5,4 ⁽¹⁾ ; 3,3 ⁽²⁾	1,7 à 4,6 ⁽¹⁾ ; 5,0 ⁽²⁾	1,4 à 4,6 ⁽¹⁾ ; 3,2 à 4,0 ⁽²⁾	⁸⁵ Kr – exposition externe
	0,7	0,4 à 2,9	0,7 à 3,6	0,64 à 4,0	¹⁴ C – inhalation et ingestion de denrées
	1,1	0,25 – 2,7	0,3 à 2,6	0,24 à 2,2	¹²⁹ I – inhalation et ingestion de denrées
	–	0,02 à 0,2	0,05 à 0,2	0,02 à 0,1	⁹⁰ Sr – ingestion de denrées terrestres
	0,62	0,02 à 0,14 ⁽³⁾	0,04 à 0,25 ⁽³⁾	0,36 – 0,6	⁶⁰ Co, plutonium et ²⁴¹ Am – ingestion de denrées marines
–	0,14	0,12 à 0,16	0,13 à 0,25	³ H – inhalation et ingestion de denrées	
Malvésii	n.e	n.e	3,5 ⁽⁴⁾	3,5 ⁽⁴⁾ à 100 ⁽⁵⁾	Débit de dose gamma ambiant – Exposition externe
	2	–	0,8	1,0	Uranium – inhalation
	0,4	–	–	0,8	Uranium – ingestion de légumes
	–	0,002	0,003	0,003	Uranium – ingestion ponctuelle de 1 litre d'eau
	–	0,01	–	0,0008	Uranium – ingestion ponctuelle de 1 kg de blé
Tricastin	0,05	0,06	0,03	0,02	Uranium – inhalation
	0,003	0,003	0,003	0,003	Uranium – ingestion ponctuelle de 1 litre d'eau
Romans-sur-Isère	0,5	0,15	0,03	0,04	Uranium – inhalation
Marcoule	0,12	–	0,07	–	³ H – inhalation, transcutanée
	0,28	–	–	0,04	³ H – ingestion de denrées
	–	0,07	0,06	0,07	¹⁴ C – ingestion de denrées terrestres
Saclay	0,28	0,15	0,13	0,16	³ H – ingestion de denrées (eau notamment)
	1,4	1,4	1,2	1,5	¹⁴ C – ingestion de poissons d'étang
Grenoble (ILL)	0,14	0,05	0,04	0,03	³ H – inhalation, transcutanée
	–	0,03	0,03	0,014	³ H – ingestion de denrées
Bruyères-le-Châtel	0,14	–	–	–	³ H – inhalation, transcutanée
Valduc	0,39	0,14 à 0,22	0,07 à 0,21	0,044 à 0,074	³ H – inhalation, transcutanée
	–	0,10 à 0,15	0,06 à 0,18	0,08 à 0,13	³ H – ingestion de denrées solides
	–	0,7	0,64	0,49	³ H – ingestion d'eau

n.e : non évalué.

(1) Sur la base des activités de ⁸⁵Kr mesurées.

(2) Sur la base des mesures de débit de dose.

(3) Mollusques uniquement.

(4) 10 h à proximité de la clotûre, au niveau des dosimètres les plus exposés.

(5) Estimation IRSN, pour des personnes résidants à proximité du site, en cours de consolidation dans le cadre de l'ERS.

Sites	BR 2011-2014	BR 2015-2017	BR 2018-2020	BR 2021-2023	Radionucléide et voies d'atteinte
	Dose (µSv/an)				
Sites des CNPE	0,1	0,05 à 0,075	0,07 à 0,09	0,09 à 0,1	¹⁴ C – inhalation et ingestion de denrées terrestres
	0,12	0,007 à 0,4	0,002 à 0,5	0,003 à 0,5	¹⁴ C – ingestion de poissons fluviaux
	0,01 à 0,7	0,04 à 0,5	0,04 à 0,5	0,04 à 0,5	³ H – ingestion d'eau
	–	0,007 ⁽⁶⁾	0,0085 ⁽⁷⁾	–	³ H – inhalation, transcutanée
	–	0,003	0,002	0,003	³ H – ingestion de denrées terrestres
	–	< 0,001	< 0,001	< 0,001	³ H – ingestion de poissons fluviaux
	0,08	< 0,02	< 0,01 à 0,05	< 0,001 à 0,05	^{110m} Ag – ingestion de denrées marines
0,0004	< 0,001	< 0,001	0,001	⁶⁰ Co, ⁵⁸ Co, ^{110m} Ag... – exposition à l'air, ingestion de denrées	
Creys-Malville	< 0,07	0,06	–	–	³ H – inhalation, transcutanée
Fessenheim	–	–	–	0,005	³ H – ingestion de denrées
Cadarache	n.e	n.e	n.e	0,55 ⁽⁸⁾	Débit de dose gamma ambiant – Exposition externe
CSA-CIRES	n.e	n.e	n.e	0,26 ⁽⁹⁾	Débit de dose gamma ambiant – Exposition externe
Radio-activité naturelle		320			Exposition au rayonnement cosmique
		280 – 840			Voyageur aérien fréquent (20 à 60 vols/an)
		360 – 1 100			Exposition au rayonnement tellurique
		300 – 3 100			Ingestion de radionucléides naturels
		10			Consommation de 200 g de moules (²¹⁰ Po essentiellement)
		540 – 3 160			Inhalation de radon (max = Lozère, Cantal...)
		300			Gros fumeur (inhalation de ²¹⁰ Po de la feuille de tabac)

n.e : non évalué.

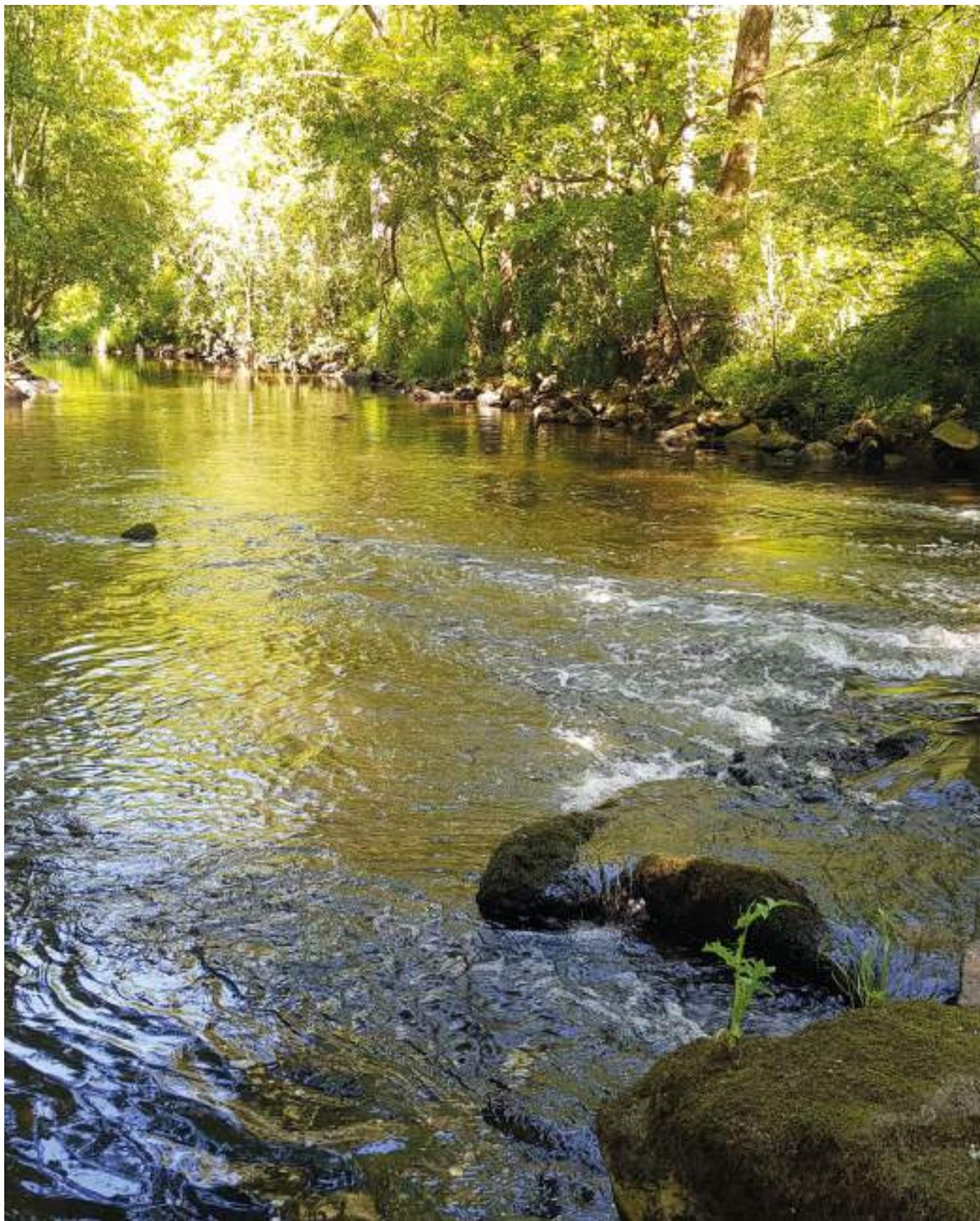
(6) Site de Cruas.

(7) Site de Saint-Alban.

(8) 10 h à proximité de la clotûre, au niveau du dosimètres le plus exposé.

(9) 10 h à proximité de la clotûre, au niveau des dosimètres les plus exposés.

Aval de l'Écarpière.



© Quenneville Céline/IRSN



03

INSTALLATIONS CLASSÉES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (ICPE)

3.1. INTRODUCTION	268
3.2. LE SITE INDUSTRIEL DE SOLVAY LA ROCHELLE	269
Les rejets radioactifs	270
Surveillance radiologique de l'environnement du site	271
Influence sur le milieu atmosphérique	271
Influence sur le milieu aquatique	276
Évaluation dosimétrique	277
Bilan	277
3.3. LES ANCIENS SITES MINIERS	278
Introduction	278
Influence potentielle des anciens sites miniers sur leur environnement et expositions du public	282
La surveillance de l'environnement autour des anciens sites miniers	282
3.4. LE SITE DU BERNARDAN	284
Présentation générale du site	284
Plan de surveillance	288
Influence du site du Bernardan sur son environnement	292

03

INSTALLATIONS CLASSÉES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (ICPE)

3.1. INTRODUCTION

Une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) est une installation, notamment industrielle, qui exerce des activités susceptibles de créer des risques (chimique, biologique, incendie...) ou de provoquer des pollutions ou des nuisances (bruit, odeur, fumée...) notamment pour la sécurité et la santé des riverains.

Certaines de ces ICPE peuvent présenter des risques de nature radiologique du fait qu'elles traitent des matériaux potentiellement contaminés ou qu'elles sont susceptibles de concentrer des radionucléides naturels présents notamment dans des résidus de production, sans toutefois répondre aux critères de définition d'une installation nucléaire de base⁽¹⁾ (INB). Les anciens sites miniers d'uranium sont à ce titre des ICPE.

Afin de réduire les risques et les impacts relatifs à ces installations et d'évaluer leurs aléas technologiques, la loi définit et encadre de manière précise les conditions d'exploitation de ces ICPE ainsi que les modalités de contrôle qui s'imposent à elles. À ce titre, ces installations font l'objet d'une surveillance radiologique de leurs rejets et de leur environnement. Contrairement aux INB, les ICPE à caractère radiologique⁽²⁾ ne relèvent pas du contrôle de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) mais des Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), et leurs activités sont encadrées par des arrêtés préfectoraux.

Les résultats des mesures réalisées dans le cadre de leur plan de surveillance sont, comme pour les INB, centralisés dans le Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM). Compte tenu du fait que leur influence potentielle sur l'environnement est généralement plus faible que celle des INB et qu'elles sont nombreuses (plusieurs dizaines d'ICPE présentant un caractère radiologique plus ou moins important sont réparties sur l'ensemble du territoire), le choix a été fait dans le cadre des bilans radiologiques, de les aborder de manière sélective et ponctuelle à titre d'illustration de leur variété et des préoccupations environnementales qu'elles peuvent induire.

Deux ICPE ont été retenues pour illustrer le présent bilan : le site industriel de Solvay à La Rochelle qui est spécialisé dans la séparation et la purification de terres rares et l'ancien site minier du Bernardan situé dans le département de la Haute-Vienne. Le site de Solvay induit un suivi radiologique du fait des minéraux dans lesquels la radioactivité naturelle a été « renforcée » (RNR) jusqu'en 1994 en raison des processus industriels mis en œuvre qui, en modifiant les équilibres physico-chimiques, ont entraîné une concentration des radionucléides naturels contenus dans les matières utilisées.

(1) Au titre du code de l'environnement (R593-2), sont notamment exclues du régime des INB les installations :

- qui mettent en œuvre des substances radioactives exclusivement sous forme de minerai d'uranium ou de résidus ou de produits de traitement de ce minerai ;
- d'entreposage ou de stockage de déchets qui détiennent des substances radioactives exclusivement sous forme de résidus de traitement de minerai d'uranium, de thorium ou de radium, ou de produits de traitement de ces minerais ;
- qui détiennent des substances radioactives exclusivement sous forme de minerai d'uranium, de thorium ou de radium ou de résidus ou de produits de traitement de ces minerais.

(2) Installations classées dans les rubriques 1700, 1716 et 1735 de la nomenclature des ICPE.

3.2. LE SITE INDUSTRIEL DE SOLVAY LA ROCHELLE

L'installation classée pour la protection de l'environnement de Solvay à La Rochelle est spécialisée dans la séparation et la purification de terres rares (oxydes, nitrates et métaux). Elle est implantée, depuis 1948, sur un terrain d'environ 40 hectares dans la zone industrielle de Chef de Baie à La Rochelle (17). Le site produit chaque année environ 4 000 tonnes de produits à base de terres rares destinés aux marchés de la catalyse, de la dépollution automobile, du polissage et de l'électronique.

Jusqu'en juillet 1994, l'usine utilisait comme matière première de la monazite, un minerai naturel très légèrement radioactif dont le traitement a généré pendant des années du nitrate de thorium comme sous-produit. L'importation et le traitement de la monazite ont été arrêtés par le site en 1994, au profit de concentrés non radioactifs.

Pendant les années de traitement des matières radioactives, le site a également généré des déchets légèrement radioactifs, les résidus radifères (RRA) et les résidus solides banalisés (RSB) (tableau 1). Des résidus solides sont également stockés sur place et constituent les remblais contaminés.

Les principales matières radioactives entreposées sur le site sont constituées d'hydroxyde brut de thorium (HBTh), de matières en suspension (MES) issues des procédés industriels de l'usine et de sels de thorium, considérés comme des matières valorisables. Les principaux déchets radioactifs entreposés sont des résidus radifères (RRA) et des résidus solides banalisés (RSB). Ces matières et déchets sont conditionnés en fûts ou en vrac et entreposés dans des bâtiments étanches en différents points dans l'enceinte interne du site, avec une majorité dans la zone est. Les MES, stockées en merlons au nord-est du site, font l'objet d'une revalorisation depuis 2010, tandis que les RRA et RSB sont dans l'attente d'un site de stockage acceptant ce type de déchets.

Seuls les déchets et les matières stockés sur le site (radionucléides de la famille du thorium-232 et le radium-226) sont à l'origine des niveaux radiologiques relevés aujourd'hui à proximité de l'usine.

TABLEAU 1 / DÉCHETS RADIOACTIFS PRÉSENTS SUR LE SITE AU 31/12/2021 (inventaire Andra)

Nature des déchets	Volume (en m ³ équivalent conditionné)	Activité déclarée (en MBq)	Radionucléides
Résidus solides banalisés (RSB) contenant 1,15 % de thorium et 0,05 % d'uranium sur produit sec	10 003	1,67.10 ⁶	²²⁸ Ra, ²²⁸ Th, ²³² Th, ²³⁸ U
Résidus radifères (RRA) produit lors de la fabrication d'oxyde de thorium à partir de nitrate de thorium	329	2,30.10 ⁵	²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra, ²²⁸ Th, ²³² Th
Remblais contaminés par des résidus d'attaque de minerais et des déchets divers (emballages, ferrailles). Les remblais sont composés d'un mélange de terres, de minerais inattaqués et de déchets divers (présence d'uranium et de thorium naturels).	35 000	-	U, Th

Les rejets radioactifs

Le site de Solvay à La Rochelle est classé « SEVESO ». À ce titre, ses activités étaient encadrées par l'arrêté préfectoral n° 15-1955-DRCTE/BAE du 2 juillet 2015, remplacé par celui du 29 juin 2023.

L'arrêté précise que les eaux industrielles susceptibles d'être radioactives doivent être traitées au sein d'une station spécifique avant de rejoindre la station de traitement interne des eaux industrielles (réseau chimique). Avant rejet dans le réseau chimique du site, un contrôle de la radioactivité des effluents est réalisé en sortie de la station de traitement des effluents radioactifs.

Le résidu solide issu du traitement des effluents radioactifs est conditionné en fût métallique et stocké sur rétention dans le bâtiment de stockage des fûts HBTh.

Pour ce qui concerne les eaux pluviales issues de l'aire de stockage en merlons des matériaux au nord-est du site, elles sont recueillies dans une fosse qui est vidangée dans le réseau interne du site par pompage après analyse de la concentration en thorium et en radium.

L'exploitant est tenu de respecter, avant rejet des eaux résiduaires dans le milieu récepteur (océan Atlantique par canal de rejet en mer localisé dans la baie de Port-Neuf), les valeurs limites définies dans le tableau 2.

Le tableau 3 et la figure 1 présentent l'évolution des rejets déclarés par Solvay depuis une dizaine d'années. Les rejets sont plus importants en 2011 et 2012, en lien avec les expérimentations réalisées dans le cadre de la mise en place du projet de valorisation des MES qui a réellement démarré à partir de 2015.

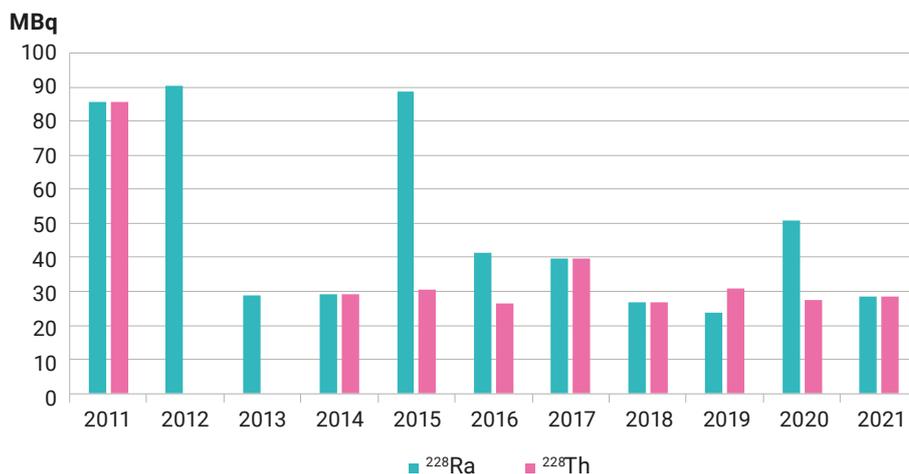
TABLEAU 2 / AUTORISATION DE REJET (arrêté préfectoral n° 15-1955-DRCTE/BAE du 2 juillet 2015)

Radio-nucléide	Activité maximale journalière (Bq/L)	Activité maximale mensuelle (MBq)	Activité maximale annuelle (MBq)
Radium-228	1	10	100
Thorium-228	1	10	100

TABLEAU 3 / REJETS LIQUIDES DE L'USINE SOLVAY À LA ROCHELLE

Année	²²⁸ Ra (MBq)	²²⁸ Th (MBq)
2011	85,7	85,7
2012	90,4	< 76,2
2013	28,7	< 59,1
2014	29,2	29,2
2015	88,6	30,5
2016	41,2	26,6
2017	39,6	39,6
2018	26,7	26,7
2019	23,8	30,7
2020	50,9	27,4
2021	28,4	28,4

FIGURE 1 / ÉVOLUTION DES REJETS LIQUIDES ANNUELS DE L'USINE SOLVAY À LA ROCHELLE



Surveillance radiologique de l'environnement du site

L'arrêté préfectoral du 2 juillet 2015 prévoit la mise en place par l'exploitant d'un programme de surveillance de l'impact radiologique des activités de l'usine (figure 2), à la fois sur les populations et sur l'environnement, en ciblant :

- le compartiment aquatique, en vue de déterminer les niveaux d'activité rejetés dans l'océan Atlantique en lien avec les rejets des eaux industrielles de l'installation ;
- le compartiment atmosphérique avec la mesure du rayonnement ambiant en 23 points sur le périmètre du site, et deux stations de prélèvement pour analyse mensuelle du radon dans l'air ;
- la nappe phréatique, à l'aplomb de l'installation, afin de confirmer l'absence de pollution de celle-ci.

L'IRSN réalise également une surveillance de l'environnement à proximité de l'installation, avec des mesures dans les sédiments marins et le milieu atmosphérique. Le tableau 4 synthétise les plans de surveillance réglementaire de l'exploitant et de l'IRSN.

Influence sur le milieu atmosphérique

Les analyses en ^{230}Th , ^{232}Th et ^{238}U réalisées par l'IRSN sur les filtres de prélèvement d'aérosols atmosphériques sont présentées sur la figure 3. Ces résultats confirment que les activités en thorium-232 dans l'air à proximité de l'usine Solvay La Rochelle, sont significativement supérieures aux activités mesurées sur des filtres prélevés, sur les mêmes périodes, sur des stations localisées hors influence d'installations émettant ce radionucléide (figure 4, semaines 1 et 37 choisies arbitrairement dans le but d'obtenir des valeurs de référence pour le thorium-232 dans les aérosols). En dehors du thorium et de l'uranium (radionucléides d'origine naturelle), aucune mesure par spectrométrie gamma des filtres de l'IRSN ne fait apparaître d'activité significative pour les radionucléides d'origine artificielle.

La figure 3 permet également d'observer un effet de saisonnalité sur les activités en thorium des aérosols atmosphériques. En effet les conditions estivales par temps sec favorisent l'envol des poussières, notamment lorsque le processus de valorisation des matières en suspension est en cours. Lors de ce processus, les matières stockées en merlons (sous bâche) sont découvertes et manipulées pour pouvoir être transportées vers une fosse dans l'objectif de leur faire subir un traitement chimique permettant de séparer les composants de ces matières et ainsi d'en isoler une partie en vue de leur valorisation. L'autre partie n'étant pas exploitable, elle est considérée et traitée comme un déchet.

TABLEAU 4 / PLANS DE SURVEILLANCE DU SITE DE SOLVAY LA ROCHELLE

	Surveillance de l'exploitant	Surveillance IRSN
Débit d'équivalent de dose gamma ambiant	• 23 points en limite de site avec dosimètre passif : mesure en continu	• 1 point avec mesure en continu au centre-ville (réseau Téléray)
Aérosols	• 2 stations pour le radon, prélèvement mensuel : détermination de l'EAP (énergie alpha potentielle)	• 1 point (au sud du site), prélèvement hebdomadaire : mesure des émetteurs γ , mesure du thorium et de l'uranium* par ICPMS
Sédiment marin	–	• 2 points, prélèvement semestriel : mesure des émetteurs γ , mesure du thorium et de l'uranium* par ICPMS
Eaux industrielles	• 1 point (station de traitement avant rejet), <i>a minima</i> , prélèvement de 24 h, 4 fois par an : mesure des ^{228}Ra et ^{228}Th	–
Eau de nappe	• 16 points, prélèvement semestriel : mesure des ^{238}U , ^{228}Ra et ^{228}Th	–

* Mesure de l'uranium ajoutée à partir de 2022 pour les sables marins et 2023 pour les aérosols.

FIGURE 2 / LOCALISATION DES POINTS DE SURVEILLANCE AUTOUR DU SITE DE SOLVAY À LA ROCHELLE

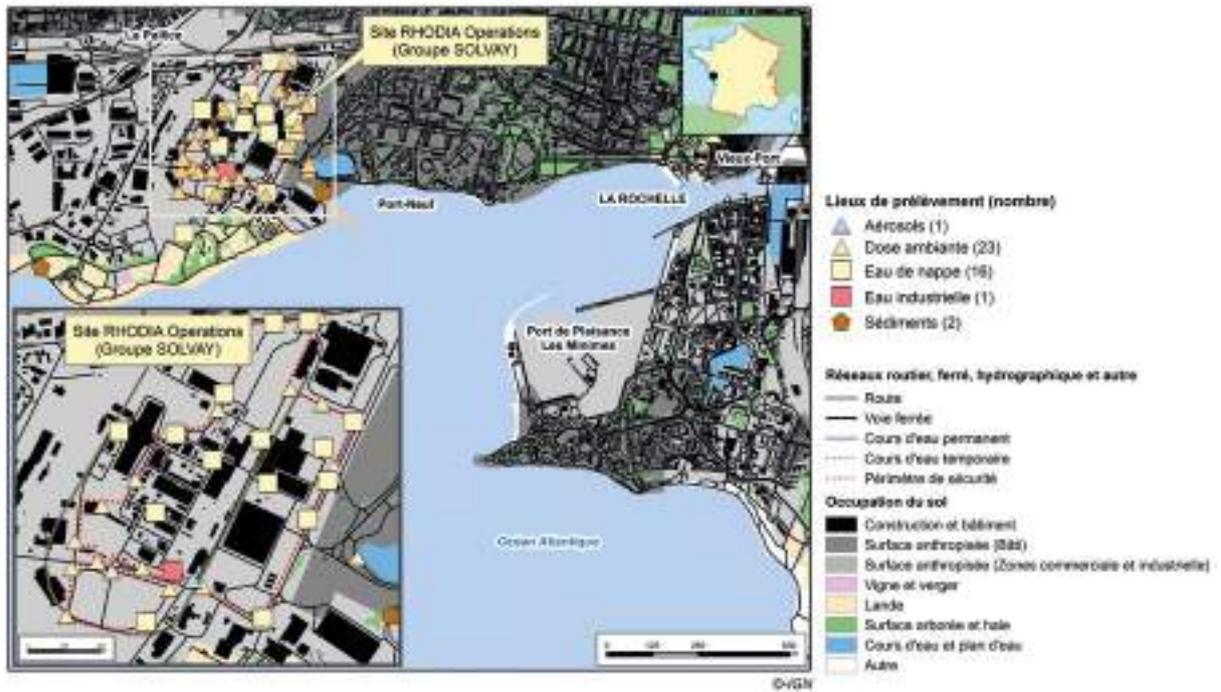


FIGURE 3 / ACTIVITÉS RADIOLOGIQUES EN ^{230}Th , ^{232}Th ET ^{238}U SUR LES FILTRES AÉROSOLS PRÉLEVÉS SUR LA STATION DE L'IRSN ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)

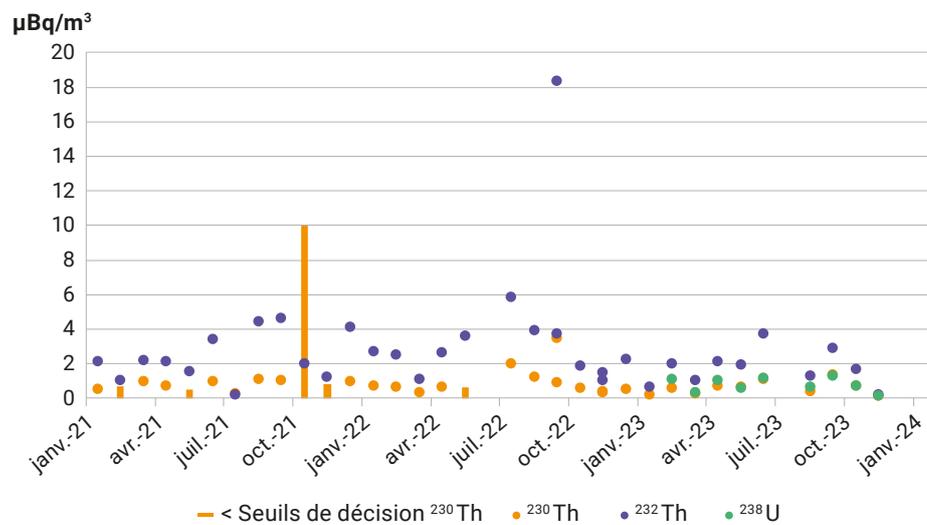
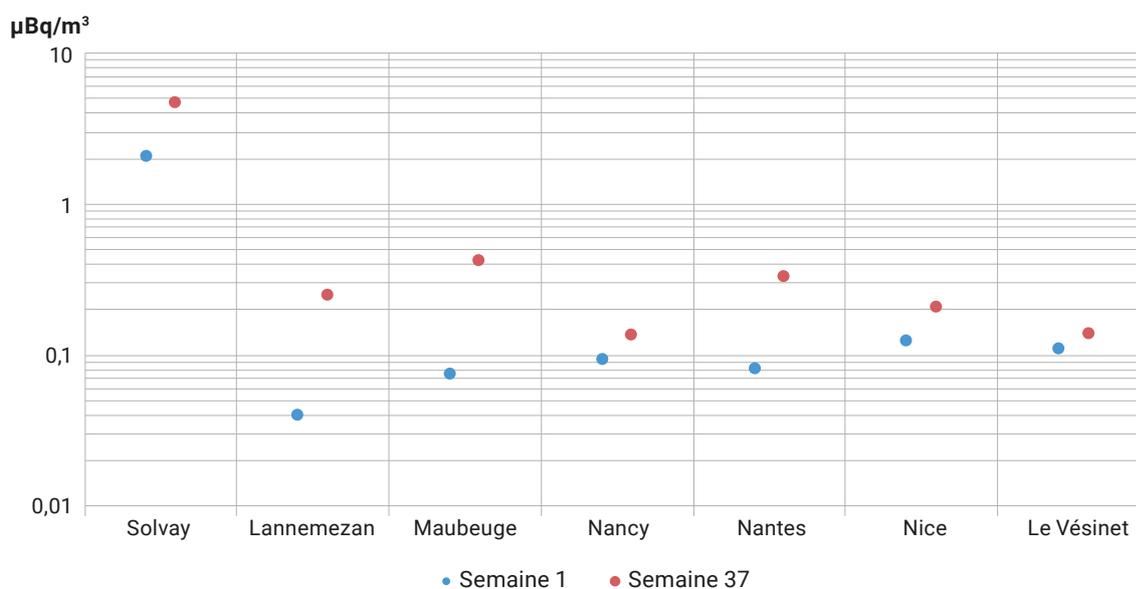


FIGURE 4 / COMPARAISON ENTRE LES ACTIVITÉS EN ^{232}Th DES AÉROSOLS ATMOSPHÉRIQUES DE LA STATION DE L'IRSN AU SEIN DE L'USINE DE SOLVAY LA ROCHELLE ET CEUX DES AUTRES STATIONS DE PRÉLÈVEMENT LOCALISÉES, HORS INFLUENCE DE TOUTE SOURCE ANTHROPIQUE DE RADIOACTIVITÉ POUR LES SEMAINES 1 ET 37 EN 2021 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)



En juillet 2022, l'élévation de l'activité en thorium-232 de l'ordre de $6 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (pour une moyenne de $2,9 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour le reste des résultats) correspond à une période de criblage (tri des déchets) dans les merlons. La matière a été manipulée, engendrant une dispersion locale des poussières. L'activité en thorium-232 la plus importante a été relevée en septembre 2022 ($18 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$), en lien avec une campagne de nettoyage des voies de circulation du site ayant été effectuée de manière mécanique (balayeuse industrielle) étant donné les restrictions d'usage de l'eau en cette période de sécheresse estivale.

À partir de 2023, l'IRSN a mesuré l'uranium-238 par ICP-MS dans les aérosols prélevés à proximité du site et les activités sont comprises entre $0,097$ et $1,28 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Ces niveaux sont du même ordre de grandeur que ceux observés à la station très grand débit de l'IRSN localisée à Bure, hors de toute influence de rejets atmosphériques d'uranium (entre $0,48$ et $1,9 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour le thorium-234, ces activités pouvant être appliquées à l'uranium-238 par l'équilibre séculaire existant, dans un milieu hors influence, entre

ces deux radionucléides issus de la même chaîne de désintégration). La figure 3 montre également que l'équilibre séculaire est respecté entre l'uranium-238 et son descendant le thorium-230, les activités mesurées pour chacun de ces radionucléides étant très proches.

Pour ce qui concerne les mesures d'exposition gamma, les données relatives aux dosimètres passifs positionnés autour du site le long de la clôture, dans le cadre de la surveillance mise en place par Solvay, sont disponibles entre 2009 et le premier semestre 2018. Les valeurs s'étendent de $85 \text{ nSv}/\text{h}$ (correspondant au bruit de fond local) à $435 \text{ nSv}/\text{h}$ (environ 5 fois le bruit de fond local). La figure 5 représente de manière statistique ces données. Les dosimètres relevant les niveaux les plus importants correspondent d'une part à ceux positionnés à l'est du site à proximité des bâtiments de stockage des fûts de déchets et d'autre part à ceux positionnés au sud du site, en lien avec la présence de déchets anciens enfouis au sein de la parcelle 102 localisée en face de l'entrée principale de Solvay au sud du site (figure 6).

FIGURE 5 / REPRÉSENTATION STATISTIQUE DE L'EXPOSITION GAMMA RELEVÉE À L'AIDE DES DOSIMÈTRES PASSIFS POSITIONNÉS EN CLÔTURE DU SITE DE SOLVAY À LA ROCHELLE ENTRE 2009 ET 2018

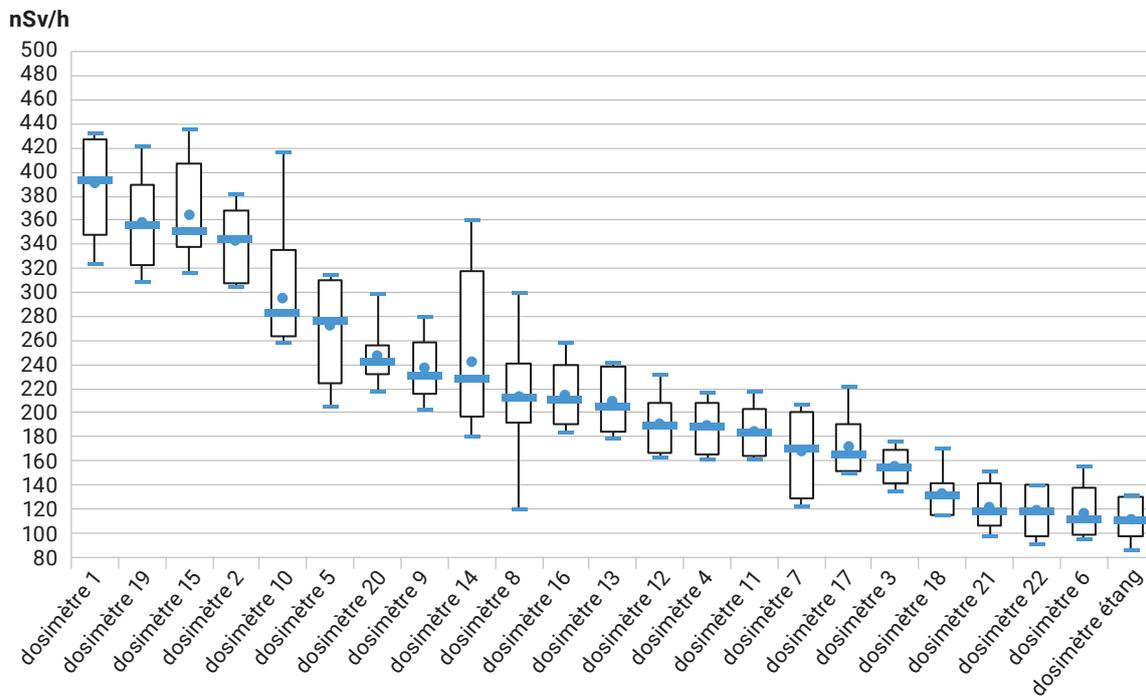
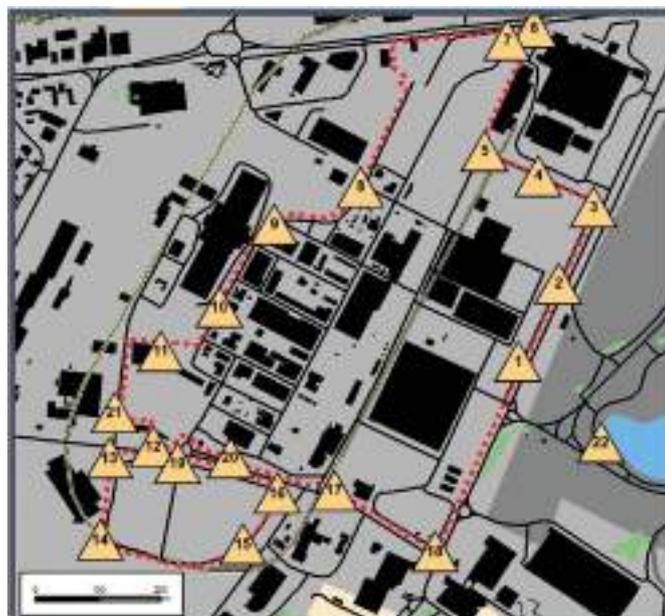


FIGURE 6 / LOCALISATION DES DOSIMÈTRES PASSIFS POSITIONNÉS EN CLÔTURE DU SITE DE SOLVAY À LA ROCHELLE



En février 2018, l'IRSN a réalisé des mesures de débit d'équivalent de dose dans la ville, à l'aide de deux spectromètres gamma embarqués dans un véhicule.

En cohérence avec les résultats d'exposition des dosimètres passifs positionnés par l'usine en clôture du site, cette campagne de mesure a révélé plusieurs zones présentant une élévation du débit d'équivalent de dose significativement supérieur à la valeur du bruit de fond régional (environ 70 nSv/h). Ces zones sont situées sur les voies publiques à proximité du site de Solvay et plus particulièrement au sud et à l'est du site (figure 7), en cohérence avec les résultats d'exposition des dosimètres passifs positionnés en clôture du site.

En parallèle des mesures embarquées en véhicule, une mesure ponctuelle a été réalisée au contact du sol, sur la voie publique située au sud de Solvay, et a révélé un débit d'équivalent de dose de 516 nSv/h (de l'ordre de 7 fois supérieur au bruit de fond local).

En avril 2018, l'IRSN a réalisé des mesures complémentaires dans la zone située à l'est de Solvay à l'aide d'un spectromètre gamma disposé dans un sac à dos. Les résultats de ces mesures pédestres ont montré des niveaux de débit d'équivalent de dose allant jusqu'à 400 nSv/h pour les zones les plus proches du site industriel (figure 8).

FIGURE 7 / DÉBITS D'ÉQUIVALENT DE DOSE RELEVÉS À L'AIDE DU DISPOSITIF DE SPECTROMÉTRIE GAMMA ROUTIER (le rayonnement cosmique n'est pas pris en compte par ce dispositif de mesure - chapitre 1)



FIGURE 8 / DÉBITS D'ÉQUIVALENT DE DOSE RELEVÉS À L'AIDE DU DISPOSITIF DE SPECTROMÉTRIE GAMMA « SAC À DOS » (mode pédestre) (le rayonnement cosmique n'est pas pris en compte par ce dispositif de mesure - chapitre 1)



Influence sur le milieu aquatique

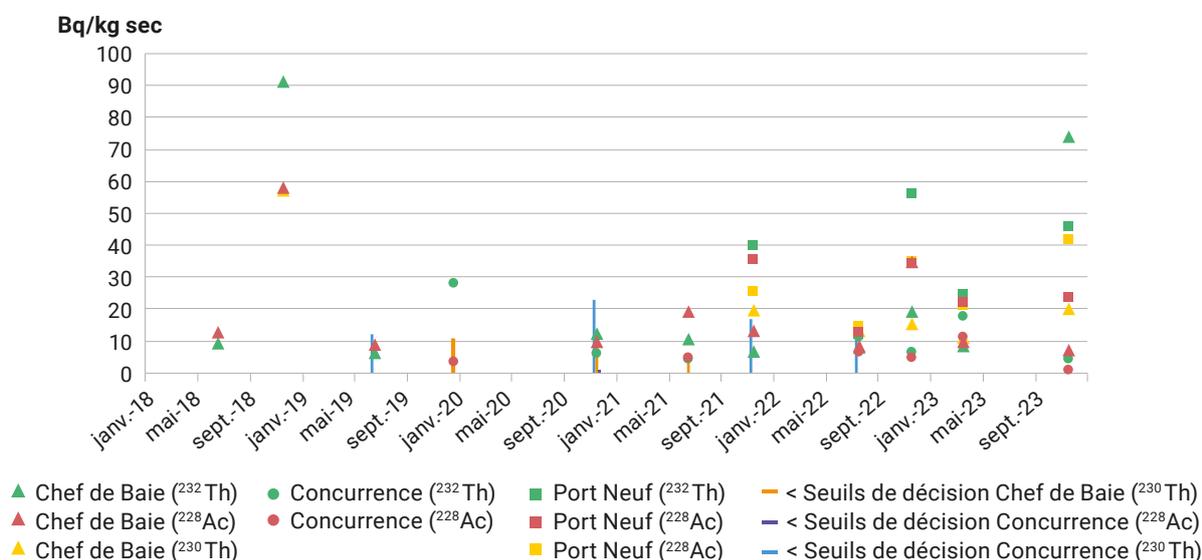
Depuis 2018, l'IRSN réalise des prélèvements de sédiments marins au sud du site au niveau de la baie de Port Neuf et de la plage Chef de Baie, à la sortie de la zone portuaire de La Rochelle. La baie de Port Neuf correspond à la zone du canal de rejet des eaux industrielles de l'usine de Solvay. Entre 2019 et 2022, les prélèvements n'ont pas pu être effectués dans la baie citée ci-dessus étant donné la présence de travaux ne permettant pas l'accès au point de surveillance. Le prélèvement a donc été effectué à la plage de la Concurrence à 4 km à l'est du point habituel.

La figure 9 présente les activités en ^{230}Th , ^{232}Th et ^{228}Ac dans les sédiments marins prélevés par l'IRSN. Pour la plupart des prélèvements, les activités en thorium-232 sont du même ordre de grandeur que les activités moyennes observées dans les roches sédimentaires en France. Cependant, plusieurs prélèvements font apparaître une rupture dans la chaîne du thorium-232 (thorium-232 en excès donc déséquilibre avec son descendant l'actinium-228), mettant en lumière la présence de thorium d'origine anthropique.

Pour ce qui concerne les mesures réalisées par Solvay dans les eaux de la nappe phréatique au droit du site (usage industriel uniquement et non pour l'alimentation en eau potable), les données sont disponibles jusqu'en 2022. Pour le radium-228 mesuré sur la période 2021-2022, 50 % des résultats sont supérieurs aux seuils de décision et les valeurs s'étendent de 0,025 à 0,245 Bq/L. En 2006, dans le cadre d'une étude de référence en amont de la construction des bâtiments abritant aujourd'hui les fûts de stockage de déchets, l'exploitant avait mesuré des activités pouvant aller jusqu'à 2,64 Bq/L. Les activités en radium-228 ont donc été divisées par 10 depuis la mise à l'abri, sous bâtiments, des fûts de déchets.

En revanche, pour les mesures d'uranium, près de 89 % des résultats de la période 2021-2022 sont supérieurs aux seuils de décision et les niveaux sont compris entre 1,1 et 37,5 µg/L. Lors de l'étude de référence de 2006 citée précédemment, les valeurs à l'aval de la nappe étaient inférieures à 15 µg/L. Les activités en uranium dans l'eau de la nappe ont donc augmenté depuis l'état de référence de 2006.

FIGURE 9 / ACTIVITÉS EN ²³⁰TH, ²³²TH ET ²²⁸AC DES SÉDIMENTS MARINS PRÉLEVÉS À LA ROCHELLE PAR L'IRSN (Bq/kg sec)



Évaluation dosimétrique

L'impact dosimétrique des rejets atmosphériques du site et des stockages de matières sur le site de Solvay a pu être calculé sur la base des mesures réalisées dans l'environnement du site pour l'inhalation et l'exposition externe au rayonnement gamma.

Les profils retenus par l'IRSN correspondent à ceux d'un agent d'entretien des installations sportives situées à l'est du site (figures 7 et 8) présent 1 600 h/an et d'un enfant (12-17 ans) pratiquant des activités sportives, au niveau du *skatepark*, présent 730 h/an (2 h/jour). Sur la base de ces hypothèses, la dose reçue par inhalation du thorium-232 et de l'uranium-238 présent dans l'air à proximité du site de Solvay serait d'environ 5,2 µSv/an pour l'agent et 2 µSv/an pour l'enfant. Ces doses sont très inférieures à celles dues à l'exposition externe induite par la présence de stockages de matières sur le site de Solvay. Dans l'hypothèse d'un débit d'équivalent de dose ajouté moyen, par rapport au bruit de fond local (environ 0,07 µSv/h mesurés par la balise Téléray de l'IRSN positionnée au niveau de la préfecture de la Charente-Maritime au centre-ville de La Rochelle) de l'ordre de 0,2 µSv/h sur l'ensemble des installations sportives pour l'agent et de 0,1 µSv/h au niveau du *skatepark*, les doses ajoutées par exposition externe au rayonnement gamma pour les

profils types retenus seraient d'environ 320 µSv/an pour l'agent et 70 µSv/an pour l'enfant. Cette évaluation est très proche de celle réalisée par l'exploitant⁽³⁾.

Aux doses présentées ci-dessus, viennent s'ajouter celles dues à la présence de radon émanant du site, un radionucléide gazeux descendant des chaînes de désintégration du thorium-232 et l'uranium-238 (chapitre 1.3, pp. 19-20). La dose estimée par l'exploitant sur la base des mesures d'énergie alpha potentielle volumique (EAPv) de radon-222 et de radon-220 serait de l'ordre de 100 µSv/an pour l'agent d'entretien.

Bilan

Les activités mesurées dans l'environnement de l'usine de Solvay La Rochelle montrent l'influence des rejets du site sur les compartiments atmosphériques et aquatiques. Les niveaux radiologiques observés sont, de fait, supérieurs à ceux relevés sur les mêmes types de prélèvement réalisés dans les régions françaises hors influence d'installations nucléaires.

Les opérations de valorisation des matières en suspension étant toujours en cours, l'IRSN continue d'exercer une surveillance régulière de l'environnement à proximité du site de Solvay La Rochelle.

(3) Scénario exploitant : le profil type retenu comme le plus exposé correspond au cas d'un agent d'entretien des installations sportives qui travaille au niveau des installations sportives situées à l'est du site sur une durée de 2 000 h/an (1 600 h/an sur les terrains de sport et 400 h/an rue Wilson). Sur la base de ces hypothèses, la dose ajoutée due à l'exposition externe induite par la présence de stockages des matières et déchets sur le site serait de l'ordre de 350 µSv/an selon le cas considéré.

3.3. LES ANCIENS SITES MINIERS

Introduction

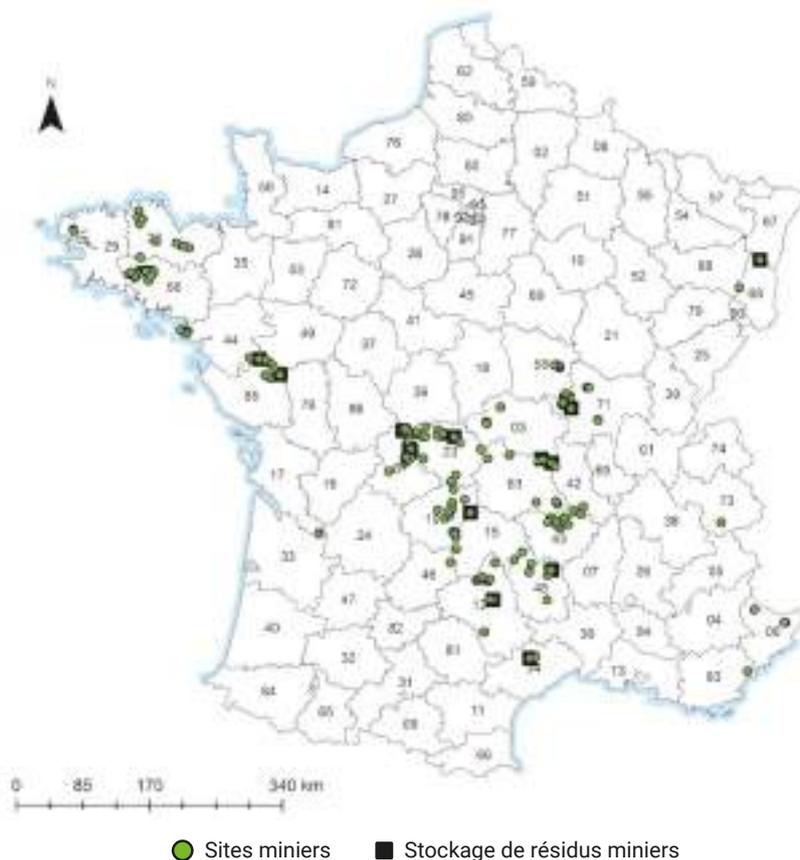
Un recensement exhaustif de l'ensemble des anciens sites d'exploration, d'exploitation et de traitement de minerai d'uranium, a été entrepris par l'IRSN dans le cadre d'un programme intitulé MIMAUSA (Mémoire et impact des mines d'uranium : synthèse et archives) à la demande du ministère de la Transition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

À ce jour, la base MIMAUSA recense 250 sites miniers répartis sur 27 départements (figure 10). Ces 250 sites sont très différents du point de vue de leur taille (de quelques ares à plusieurs hectares), des activités minières qui y ont été pratiquées (de simples travaux de reconnaissance à la présence d'une usine de traitement du minerai ou non, etc.) ou des quantités d'uranium produites par l'activité minière (20 kg à plus de 14 000 tonnes pour le site du Bosc dans l'Hérault,

figure 11). Les anciens sites miniers présentent donc aujourd'hui des caractéristiques et des enjeux très différents non seulement de par les travaux miniers et les activités industrielles pratiquées sur les sites mais aussi du fait du réaménagement effectué après leur fermeture, leur environnement et l'usage qui est fait de cet environnement.

Ce chapitre du *Bilan radiologique* présente tout d'abord des généralités sur les anciens sites miniers d'uranium français. Il fournit des informations sur les types d'exploitation minières, les activités industrielles pratiquées sur les sites, les sous-produits générés et leur gestion ainsi que les différents types de réaménagement. Ensuite, le bilan présente les différentes influences potentielles que peut avoir un site minier sur son environnement ainsi que la surveillance qui permet de caractériser cette influence et les expositions potentielles de la population locale susceptible d'en résulter. Afin d'illustrer cette influence, après les sites de l'Écarpière, de la Commanderie, du Bosc et de La Porte, présentés dans le *Bilan radiologique 2015-2017* puis le site industriel

FIGURE 10 / LOCALISATION DES ANCIENNES MINES D'URANIUM ET DES STOCKAGES DE RÉSIDUS DE TRAITEMENT DU MINERAI D'URANIUM EN FRANCE (d'après données Mimausa)



de Bessines (SIB) dans le précédent *Bilan radiologique 2018-2020*, c'est le site du Bernardan qui a été choisi pour le présent bilan.

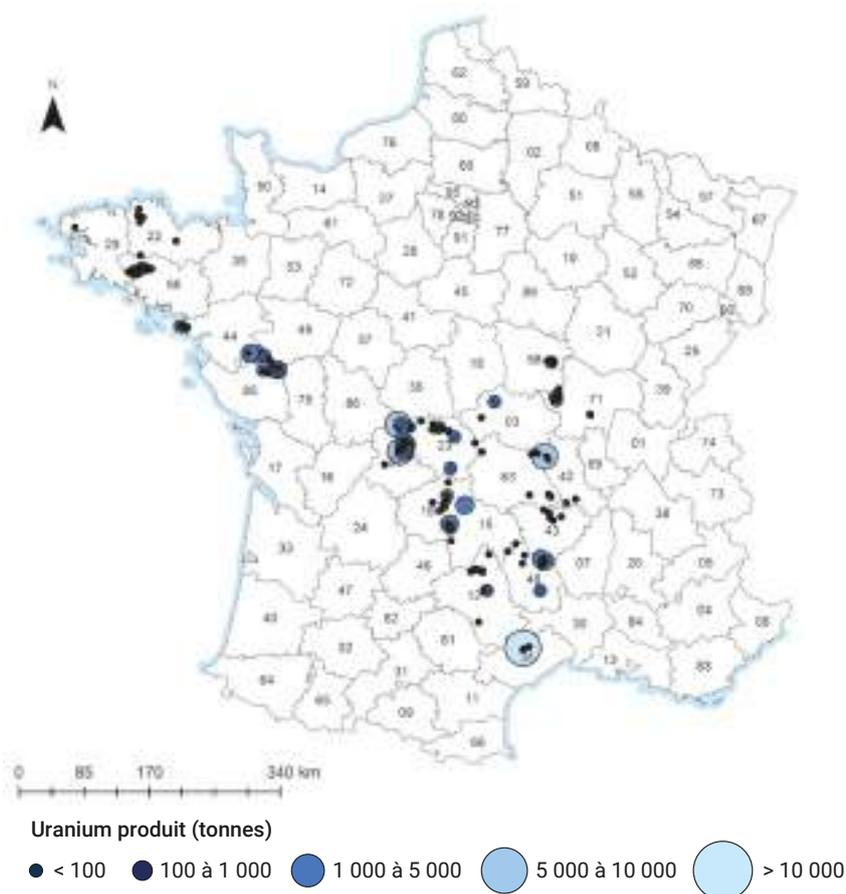
Généralités sur les sites miniers

L'exploitation industrielle de l'uranium en France a débuté après la Seconde Guerre mondiale et a cessé en 2001 avec la fermeture de la dernière mine en exploitation sur le territoire national. Le CEA a réalisé les premières prospections et exploitations minières d'uranium. Celles-ci ont été poursuivies par sa filiale COGEMA (Compagnie générale des matières nucléaires) à partir de 1976 ainsi que par plusieurs petites sociétés privées. C'est progressivement que COGEMA, puis Areva et actuellement Orano assurent la responsabilité d'exploitant de la plupart des anciens sites miniers. Seuls quelques-uns, exploités par des sociétés ayant disparu sans avoir été au préalable rachetées, dépendent actuellement directement de l'État.

Les anciennes mines sont principalement réparties sur des massifs granitiques tels que le Massif central ou le Massif armoricain. Ces formations sont naturellement riches en uranium avec localement des concentrations plus élevées. En effet, l'uranium est présent dans la nature dans de nombreux minéraux (comme par exemple la pechblende, la coffinite ou l'autunite). Une roche qui contient ces minéraux en proportion suffisamment intéressante pour justifier l'exploitation est alors qualifiée de minerai. Préalablement à l'exploitation, des travaux dits de reconnaissance par petits chantiers (TRPC) pouvaient être réalisés afin d'estimer la faisabilité d'une exploitation. Ils pouvaient être composés de tranchées ou de petites galeries reliées à la surface par un puits. En France, le minerai était ensuite extrait *via* deux méthodes d'exploitation :

- la mine à ciel ouvert (MCO) ;
- les travaux miniers souterrains (TMS).

FIGURE 11 / RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DE LA PRODUCTION FRANÇAISE D'URANIUM (d'après données Mimausa)



Ainsi, l'exploitation des mines d'uranium et le traitement de minerais d'uranium ont conduit à générer deux types de sous-produits : les stériles et les résidus de traitement. En effet, l'accès au minerai nécessitait, dans un certain nombre de cas, d'excaver les roches présentant des teneurs en uranium trop faibles pour l'exploitation industrielle de la formation géologique. Ces roches sont appelées « stériles » (tableau 5). On distingue classiquement deux types de stériles :

- les stériles francs qui correspondent aux roches encaissantes du gisement granitique ou sédimentaire qui ont été extraites afin d'accéder au gisement. Ces stériles ont des teneurs en uranium faibles, de l'ordre de quelques g/t ;
- les stériles de sélectivité ou de coupure qui correspondent aux matériaux du gisement dont la teneur en uranium a été jugée insuffisante, inférieure à un « seuil de coupure », pour être considérés comme un minerai marchand. La valeur du seuil de coupure a évolué dans le temps en fonction de l'évolution des prix de l'uranium et de l'évolution des techniques d'exploitation. Au début des années 1990, avec l'effondrement des cours, le seuil de coupure est ainsi passé de 100 à 400 g/t pour les mines à ciel ouvert et de 200 à 400 g/t pour les mines souterraines (coût plus élevé).

Au moment de l'exploitation minière, ces stériles ont été disposés en verses⁽⁴⁾ ou utilisés pour le réaménagement des sites miniers.

Une fois séparé des stériles, le minerai était broyé puis traité chimiquement de manière à en extraire l'uranium. Les opérations industrielles correspondantes étaient effectuées soit en usine (traitement par lixiviation dynamique), soit en tas sur des aires aménagées dans l'emprise minière (traitement par lixiviation statique). Il existait huit usines d'extraction du minerai réparties sur différents sites miniers et qui traitaient les minerais riches des mines voisines. Les minerais considérés comme pauvres étaient placés sur des aires étanches où ils étaient arrosés d'eau et d'acide sulfurique afin d'extraire l'uranium par solubilisation (traitement statique). À l'issue des étapes de traitement, deux produits étaient récupérés :

- l'uranium sous forme de concentré jaune appelé « *yellow cake* », utilisé dans la préparation de combustible pour les réacteurs nucléaires ;
- les résidus de traitement.

Les résidus de traitement du minerai ont été stockés, au fur et à mesure de leur production, à proximité des activités de traitement du minerai dans des mines à ciel ouvert, des bassins ceinturés par des digues ou des thalwegs⁽⁵⁾ barrés par des digues. Ces digues sont constituées de stériles, résidus de traitement statique et/ou sables cyclonés issus du traitement dynamique.

Un peu plus de 48 millions de tonnes de minerais ont été extraites des mines françaises. À l'issue du traitement, environ 76 000 tonnes d'uranium ont été produites sur une cinquantaine d'années et 48 millions de tonnes de résidus de traitement du minerai ont été stockées dans 16 stockages répartis sur 15 anciens sites miniers et dans un stockage sur la commune de Gueugnon (qui accueillait une usine de traitement du minerai sans qu'il n'y ait d'exploitation minière, figure 11).

TABLEAU 5 / ORDRES DE GRANDEUR DES TENEURS EN URANIUM ET NIVEAUX DE RADIOACTIVITÉ CLASSIQUEMENT ASSOCIÉS AUX MATÉRIAUX ET RÉSIDUS PRÉSENTS SUR LES SITES MINIERS

	Teneur en uranium (g/t)	Activité en ²³⁸ U (Bq/kg)	Activité en ²²⁶ Ra (Bq/kg)
Moyenne des sols et roches en France*	Quelques g/t	Quelques dizaines	Quelques dizaines
Roche granitique**	Quelques dizaines de g/t	Quelques centaines	Quelques centaines
Stériles	Quelques dizaines à centaines de g/t	Quelques centaines à milliers	Quelques centaines à milliers
Résidus	Quelques dizaines à centaines de g/t	Quelques centaines à milliers	Quelques dizaines de milliers
Minerais	De l'ordre de mille g/t	Quelques dizaines de milliers	Quelques dizaines de milliers

* Moyenne des valeurs constatées pour des sols et des roches en France, quel que soit le contexte géologique concerné.

** Hors minerai.

(4) Verse : empilement de stériles miniers.

(5) Thalweg : ligne qui suit la partie la plus basse d'une vallée. Il est souvent matérialisé par le lit d'un cours d'eau.

À la fin de l'exploitation minière, les travaux miniers ont fait l'objet d'une mise en sécurité pour prévenir les risques miniers (notamment ceux liés aux mouvements de terrain) et les sites ont été réaménagés de sorte à réduire leurs impacts sur l'Homme et l'environnement et à assurer leur intégration paysagère (figure 12). Les accès aux galeries ont été condamnés, les puits scellés et les travaux miniers souterrains ont été noyés et pour certains remblayés. Les mines à ciel ouvert non utilisées comme réceptacle pour les résidus de traitement ont été soit noyées, créant ainsi des plans d'eau artificiels, soit remblayées avec des stériles. Enfin, les terrains ont été reprofilés avec des stériles des verses afin d'atténuer les modifications topographiques engendrées par l'exploitation minière et limiter le ruissellement. À ce jour, les traces de l'activité minière passée se réduisent visuellement à une modification plus ou moins marquée de la topographie (dépressions associées aux anciennes mines à ciel ouvert, buttes constituées par des dépôts de stériles miniers...). Les anciennes usines ont été démantelées et une couverture multicouche, constituée généralement de résidus de lixiviation statique, de stériles et de terre végétale, a été mise en place sur les stockages de résidus miniers. Cette couverture assure une protection physique et radiologique en limitant l'émission des rayonnements gamma et l'exhalation de radon à l'aplomb du stockage. Il est à noter qu'il existe un stockage de résidus pour lesquels la protection vis-à-vis des rayonnements gamma est assurée par une lame d'eau qui recouvre les résidus. Il s'agit du site des Bois Noirs Limouzat. Le stockage de la Commanderie est également sous une lame d'eau mais contrairement aux Bois Noirs Limouzat, il possède également une couverture multicouche solide.

Par ailleurs, les déchets d'exploitation et de démantèlement des usines ont été stockés avec les résidus. De plus, certains stockages peuvent recevoir périodiquement les boues des stations de traitement des eaux présentes sur quelques anciens sites miniers d'uranium sous couvert d'une autorisation préfectorale.

Une partie des terrains concernés par l'exploration et l'exploitation minière a été rétrocédée à des particuliers, des communes ou des entreprises, une autre partie demeurant propriété d'Orano. Ainsi, des terrains directement concernés par l'activité minière (notamment des zones de dépôts de stériles et des mines à ciel ouvert) ont ainsi été rendus à leurs usages initiaux ou affectés à de nouveaux usages comme des usages agricoles, forestiers ou récréatifs (pêche, promenade...). La responsabilité d'Orano s'exerce tant que les sites n'ont pas fait l'objet d'une procédure de fermeture administrative régulière, qu'il soit ou non propriétaire des terrains.

FIGURE 12 / MINE À CIEL OUVERT DU SITE DE BELLEZANE (Haute-Vienne) AVANT ET APRÈS RÉAMÉNAGEMENT (source : Orano)



Mine à ciel ouvert de Bellezane en cours d'exploitation.



Mine à ciel ouvert de Bellezane réaménagée.

Influence potentielle des anciens sites miniers sur leur environnement et expositions du public

Autour d'un site minier le public peut être exposé :

- aux rayonnements gamma (exposition externe) produits par les différentes sources susceptibles d'être présentes sur un site minier (stériles, résidus). Ces rayonnements gamma peuvent avoir une influence sur le site lui-même ou dans son environnement immédiat entraînant une modification de la dose externe reçue par des personnes susceptibles de fréquenter ses abords ;
- au radon, isotope de la filiation radioactive de l'uranium-238, présent naturellement dans les massifs granitiques et donc dans les matériaux provenant de la mine (stériles, résidus) ;
- aux poussières mises en suspension à partir de matériaux radioactifs présents sur le site. Cependant les sites réaménagés ne sont théoriquement pas de nature à générer une émission significative de poussières compte tenu des réaménagements réalisés (présence de couverture végétale, etc.) et, en l'absence de modification (ex. travaux), la remise en suspension de poussières dans l'air, sur et autour d'un site minier, est généralement négligeable ;
- aux radionucléides présents dans la chaîne alimentaire ou l'eau de consommation. En effet, les écoulements d'eaux de mine ou le ruissellement des eaux de pluie sur le site minier peuvent influencer les teneurs en radionucléides naturels des cours d'eaux, lacs et étangs situés en aval du site, ainsi que celles des sédiments. Ainsi, les denrées sont principalement susceptibles d'être impactées via les usages d'irrigation ou d'abreuvement d'animaux d'élevage à partir d'eaux influencées par un site minier.

Par ailleurs, pour limiter les impacts sur la chaîne alimentaire et l'eau, les eaux issues de certains sites miniers et stockages de résidus peuvent faire l'objet d'un traitement avant leur rejet dans l'environnement. Ainsi, il existe actuellement quinze stations de traitement des eaux en fonctionnement. Les traitements peuvent concerner les paramètres radiologiques, en particulier la teneur en uranium et/ou l'activité en radium-226, mais également les paramètres physico-chimiques comme le pH ou dans certains cas, la teneur en métaux.

La réalisation d'évaluation d'impact sur la population permet de vérifier que l'influence des sites sur leur environnement reste limitée. Ainsi, les expositions sont appréciées selon la répartition de la population sur et autour du site et surtout de l'usage que la population fait de cet environnement : fréquentation de lieux situés à proximité immédiate du site ou sur le site, pêche récréative dans des cours d'eau ou dans des anciennes mines à ciel ouvert, utilisation de l'eau pour irriguer des cultures ou abreuver des animaux, etc.

Dans la mesure où les sites miniers se situent sur des territoires naturellement riches en uranium l'impact attribuable à un site donné est évalué par la différence entre les résultats de la surveillance autour de ce site et les mesures réalisées au niveau de stations de référence ou de points de référence hors influence du site.

La surveillance de l'environnement autour des anciens sites miniers

La surveillance doit permettre d'une part d'apprécier l'impact radiologique des sites miniers sur les populations et l'environnement et d'autre part de vérifier l'efficacité des réaménagements. C'est pourquoi, la surveillance autour des anciens sites miniers porte sur l'uranium-238 et ses descendants et peut concerner les différents compartiments de l'environnement : air, eaux de surface et/ou souterraines, sols, sédiments, denrées.

Aspects réglementaires

Les stockages de résidus sont des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et sont soumis à une surveillance de l'environnement. Certains anciens sites miniers, qui sont toujours régis par la police des Mines, font également l'objet d'une surveillance de l'environnement par Orano. La surveillance peut être réglementaire et/ou relever d'une surveillance complémentaire à l'initiative de l'exploitant. Les modalités de surveillance réglementaire sont définies au cas par cas dans des arrêtés préfectoraux. On distingue :

- les arrêtés préfectoraux qui réglementent les rejets des sites et définissent la surveillance nécessaire à l'évaluation de leur impact sur l'environnement ;
- les arrêtés préfectoraux fixant des prescriptions applicables à certains milieux sous influence minière dès lors que ceux-ci sont utilisés dans le cadre d'un usage sensible : baignade, pêche, alimentation en eau potable.

En complément de la surveillance exercée par Orano, des contrôles sont effectués par les DREAL (Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement), notamment lors d'inspections avec prise d'échantillons pour analyse. Des campagnes de mesures ponctuelles sont également menées par plusieurs organismes. Elles 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. L'IRSN peut intervenir en appui technique aux DREAL ou bien en réponse à toute demande des autorités. De plus, dans le cadre de sa mission propre de surveillance radiologique du territoire, l'IRSN effectue également une surveillance régulière de l'environnement local autour de quelques anciens sites miniers. Par ailleurs, l'IRSN réalise également des études de plus grande ampleur sur l'influence des anciens sites miniers d'uranium à l'échelle régionale. L'Institut a ainsi effectué, de 2011 à 2015, un constat radiologique pour caractériser l'influence des anciens sites miniers du bassin versant de la Dordogne. En complément, dans le cadre de la mise en œuvre d'un programme de caractérisation radiologique de l'environnement proche de sites contenant des sources de radioactivité appelé « étude radiologique de site » (ERS), l'IRSN réalise une telle étude à proximité du site de l'Écarpière, un ancien site minier d'uranium, avec un démarrage des actions prévu en 2024.

Description générale des dispositifs de surveillance

La surveillance radiologique effectuée autour de certains anciens sites miniers a pour objectif de caractériser son impact radiologique sur l'environnement, notamment de quantifier les possibles modifications par rapport au bruit de fond naturel local, et d'estimer les expositions potentielles de la population qui en résultent :

- la surveillance de la qualité de l'air : elle consiste en un suivi des énergies alpha potentielles (EAP) dues aux descendants à vie courte du radon-222 et du radon-220 (chapitre 1, p. 20) ainsi que de l'activité volumique des émetteurs alpha à vie longue contenus dans les poussières ;
- la surveillance du débit de dose : se fait au moyen de balises positionnées de manière permanente sur le site, dans son environnement proche ainsi que dans les zones habitées alentour (chapitre 1, p. 13) ;
- la surveillance des eaux de surface : il s'agit essentiellement de mesures d'uranium et de radium-226 réalisées dans les eaux et les sédiments du système hydrographique autour des sites ;
- la surveillance de la chaîne alimentaire : cette surveillance concerne diverses denrées alimentaires (légumes, fruits, lait, poissons...) susceptibles d'être impactées par le site *via* l'irrigation ou l'abreuvement d'animaux. À partir de ces mesures, Orano effectue des évaluations des doses qui seraient reçues par des personnes du public qui les consommeraient.

3.4. LE SITE DU BERNARDAN

Le Bilan radiologique 2021-2023 a fait le choix de présenter l'influence du site du Bernardan (figure 13) sur son environnement. Ce site a été retenu parmi les sites :

- ayant une obligation de surveillance réglementaire afin de permettre de disposer de résultats de mesures sur plusieurs années, à l'instar des sites nucléaires présentés dans ce rapport ;
- comportant un stockage de résidus de traitement du minerai d'uranium (appelés résidus miniers par la suite) ;
- dont l'environnement fait l'objet d'une surveillance réglementaire de la chaîne alimentaire ;
- n'ayant pas été retenu dans les précédents bilans.

Compte tenu du grand nombre de sites sur le territoire métropolitain et de leur diversité (configuration, historique, état post-exploitation...), ce site illustre une situation qui lui est propre, et ne saurait, à ce titre, être représentatif de l'ensemble des situations existantes en France.

Présentation générale du site

Le site du Bernardan se trouve sur la commune de Jouac, dans le département de la Haute-Vienne (87). Localisé dans le bassin versant de la Benaize, il est drainé par le ruisseau Le Rigeallet au nord.

Le site du Bernardan est l'unique site accueillant un stockage de résidus miniers ainsi qu'une station de traitement des eaux (STE) parmi les 5 anciens sites miniers d'uranium du nord du département (les Loges, la Côte Moreau, Piegut et les Masgrimauds) (figure 13). Couvrant une surface de 192 hectares dont 127 hectares sont clôturés et fermés par un portail cadenassé (périmètre dit de sécurité ; figure 14), ce site a été exploité de 1978 à 1987 par une mine à ciel ouvert (MCO) et de 1983 à 2001 par des travaux miniers souterrains (TMS).

Après des essais de traitement statique du minerai réalisés à titre expérimental sur le site entre 1978 et 1987, une usine de traitement dynamique du minerai a été construite en 1979 et a fonctionné jusqu'en 2001. Elle a permis le traitement d'environ 1 760 000 tonnes de minerais en provenance de plusieurs mines de Haute-Vienne, Creuse et Corrèze, dont 1 150 000 tonnes issues du site du Bernardan. Le traitement du minerai extrait sur le site du Bernardan a conduit à la production de 6 584 tonnes d'uranium (tableau 6).

FIGURE 13 / LOCALISATION DU SITE DU BERNARDAN (source : base Mimausa)

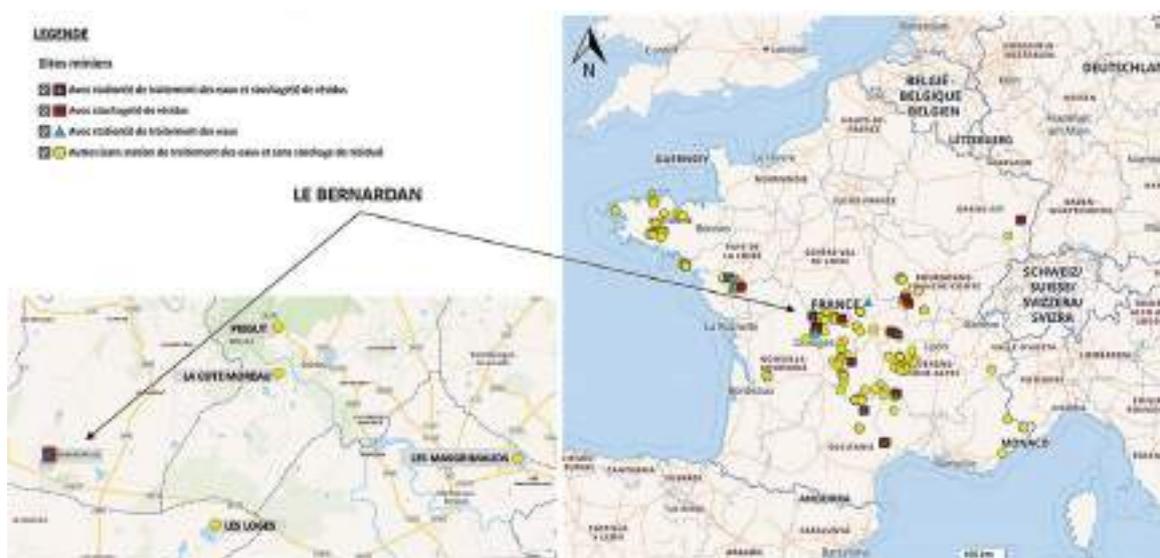


FIGURE 14 / EMBLACEMENT DES DIFFÉRENTES INSTALLATIONS (anciennes et actuelles) PRÉSENTES SUR LE SITE DU BERNARDAN (source : Géoportail)

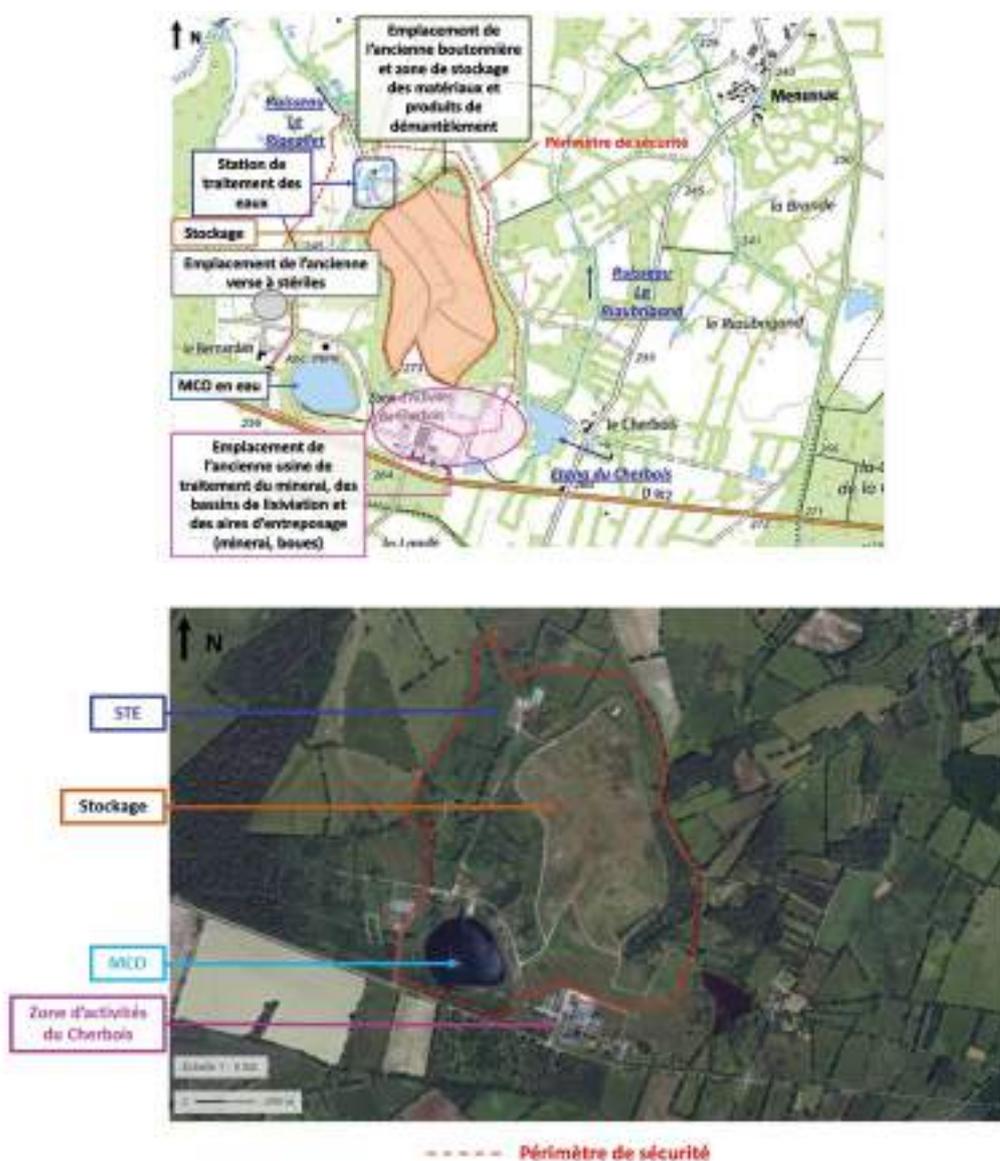


TABLEAU 6 / TONNAGE DES DIFFÉRENTS PRODUITS ISSUS DE LA MINE DU BERNARDAN ET DES INSTALLATIONS DE TRAITEMENT

Tonnage de minerai traité à l'usine (millions de tonnes)	Uranium produit dans l'usine (tonnes)	Résidus de traitement dynamique stockés (millions de tonnes)	Résidus de traitement statique stockés (millions de tonnes)
1,76 dont 1,15 provenant du site	9 643 dont 6 584 issu du site soit 8,1 % de la production française	1,811 soit 5,9 % des résidus de traitement dynamique produits en France	0,041 soit 0,2 % des résidus de traitement statique produits en France

Lors du traitement en usine, le minerai, une fois broyé a une granulométrie d'environ 500 µm, subissait une attaque à l'acide sulfurique. L'uranium présent dans les jus d'attaque était extrait, d'abord par solvant, puis par saumure avant d'être précipité sous forme de diuranate de magnésium (MgU₂O₇). Les résidus miniers récupérés lors du traitement sont appelés résidus de traitement dynamique.

Tous les résidus miniers générés sur le site (soit 1,852 Mt) ont été stockés dans 4 cellules délimitées par des digues de 12 à 15 mètres de haut, érigées à l'aide de 5,7 Mt de stériles miniers issus de l'exploitation. Le stockage de résidus ainsi constitué est une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) sous la rubrique 1735⁽⁶⁾.

L'emplacement des différentes installations du site (anciennes et actuelles) est présenté dans la figure 14.

L'arrêt de l'exploitation du site du Bernardan en 2001 a scellé la fin de l'exploitation minière d'uranium sur le territoire métropolitain.

Des travaux de réaménagement ont été réalisés de 2001 à 2003 :

- mise en sécurité :
 - de la MCO avec constitution d'un plan d'eau avec un fossé de débordement prévu vers le ruisseau du Rigeallet,
 - des TMS avec le remblayage total ou partiel d'une chambre de soutirage et des liaisons fond-jour (descenderie, galeries, cheminées d'aération) ainsi que le curage et le remblayage des différents bassins et le déséquipement du carreau minier ;
- vidange de l'usine et élimination des déchets et produits dangereux, démantèlement de l'usine et stockage des produits de démolition avec les résidus miniers ;
- construction et mise en route d'une nouvelle station de traitement des eaux ;
- curage des aires de stockage du minerai ;
- recouvrement des résidus miniers par des matériaux issus de l'exploitation minière, comprenant une couche d'arènes argileuses, puis une couche de stériles miniers et enfin une couche de terre végétale de 2,5 à 3 mètres d'épaisseur. Une petite zone a été également aménagée en vue de recevoir

les boues de traitement des eaux de la station du site (figure 14). Cette zone, appelée boutonnière, a été fermée et recouverte d'une épaisseur minimale de 20 cm de matériaux tout-venant⁽⁷⁾ ;

- curage de l'étang du Cherbois ;
- réaménagement du secteur de l'ancienne usine et du carreau minier en zone d'activité où plusieurs sociétés occupent les anciens locaux. Cette zone constitue aujourd'hui la zone d'activité du Cherbois.

Le traitement des eaux a pour objectif de réduire les activités de radium-226 et les concentrations en uranium afin de respecter les limites réglementaires de rejet (tableau 7). Il consiste en l'ajout de réactifs tels que le sulfate d'alumine, le chlorure de baryum, la chaux et un floculant pour précipiter le radium-226 et permettre ainsi la diminution de son activité dans l'eau par coagulation, floculation et décantation.

TABLEAU 7 / LIMITES RÉGLEMENTAIRES DE REJET DU SITE DU BERNARDAN

Paramètres	Valeurs	
T°	< 30 °C	
pH	[5,5 – 9,5]	
MES	< 30 mg/L	En moyenne annuelle
SO ₄ ²⁻	< 4 g/L	
Ba ²⁺	< 1 mg/L	
²³⁸ U soluble	< 1 800 µg/L	
²²⁶ Ra soluble	< 740 mBq/L	

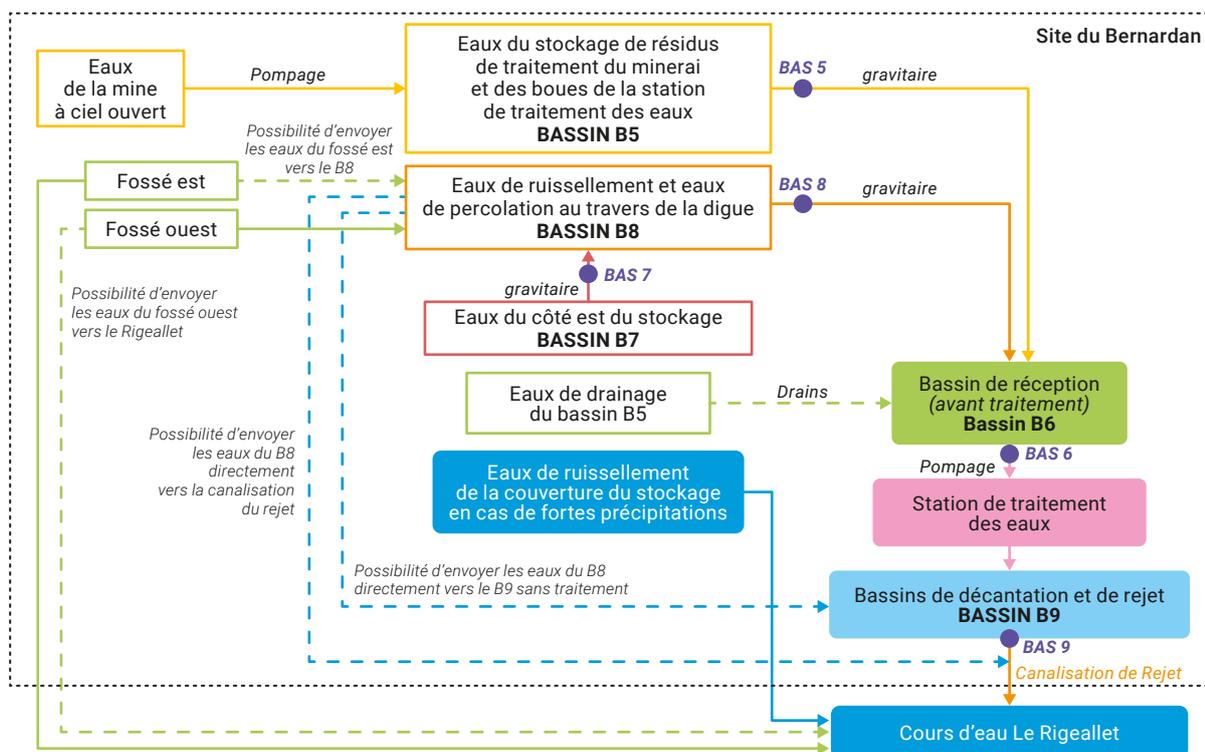
Depuis la mise en place de la nouvelle station de traitement des eaux, différents schémas de circulation des eaux se sont succédé correspondant à trois périodes de fonctionnement : avant juillet 2015, entre juillet 2015 et octobre 2018 et depuis octobre 2018. Depuis fin 2018 (figure 15), toutes les eaux nécessitant un traitement sont collectées dans le bassin de réception B6 puis, une fois traitées, sont décantées dans le bassin B9 avant rejet par une canalisation enterrée dans le ruisseau le Rigeallet (figure 17) :

- les eaux issues du stockage ainsi que les eaux pompées de la MCO sont dirigées vers le bassin B5 avant de rejoindre gravitairement le bassin B6 ;

(6) Substances radioactives (dépôt, entreposage ou stockage) sous forme de résidus de traitement de minerais d'uranium ou de thorium contenant des radionucléides naturels des chaînes de l'uranium ou du thorium et boues issues du traitement des eaux d'exhaure, sans enrichissement en uranium-235 et dont la quantité totale est supérieure à 1 tonne.

(7) Depuis la fermeture de la boutonnière, les boues de la station de traitement des eaux sont envoyées dans l'unité de stockage de Lavaugrasse (USL) en fonctionnement depuis 2019 sur le site industriel de Bessines (SIB) (Haute-Vienne).

FIGURE 15 / MODALITÉS DE GESTION DES EAUX COLLECTÉES SUR LE SITE DU BERNARDAN DEPUIS OCTOBRE 2018 (source : Orano)



- les eaux de ruissellement sur le stockage sont canalisées et collectées via un réseau de drainage mis en place lors de la réalisation de la couverture du stockage. Elles sont envoyées vers un bassin de rétention B8 avant de rejoindre gravitairement le bassin B6 ;
- les eaux d'infiltration dans la digue côté est du stockage sont dirigées vers le bassin B7 avant de rejoindre le bassin B8, gravitairement, par une canalisation enterrée.

Les servitudes instaurées par arrêtés préfectoraux des 3 juin 2003 et 11 avril 2006 imposent une utilisation des terrains compatible avec le stockage de résidus et ne remettant pas en cause l'intégrité de la couverture. Les risques liés à l'activité passée et à la présence de résidus doivent être pris en compte par tout projet.

Plusieurs projets de réalisation de parc de panneaux photovoltaïques se sont intéressés au site du Bernardan. Le premier projet, porté par la société Neoen, a fait l'objet d'un arrêté préfectoral complémentaire du 12 août 2022⁽⁸⁾, autorisant l'implantation d'un parc de panneaux photovoltaïques sur deux zones, l'une de 8,5 ha à l'ouest du site, l'autre de 9,5 ha à l'est du site, incluant 1,96 ha de la partie sud du stockage de résidus miniers (figure 16).

La société Neoen porte également un second projet d'installation d'un parc de panneaux photovoltaïques sur la zone de stockage des résidus miniers (figure 14), qui a fait l'objet d'une étude d'impact en 2023.

(8) DL/BPEUP n° 2022/082.

FIGURE 16 / EMBLEMES DU PARC DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES DU PROJET NEOEN DE 2022 (source : étude d'impact du 21/01/2019 - Burgeap RACISE01162/CACISE172402)



Plan de surveillance

Le site du Bernardan est soumis à une surveillance réglementaire prescrite par les arrêtés préfectoraux n° 2001-503 du 17 octobre 2001⁽⁹⁾, n° 2002-247 du 21 mai 2002⁽¹⁰⁾ et DCE-BPE n° 2012-20 du 20 mars 2012⁽¹¹⁾. Le plan de surveillance du site, présenté dans le tableau 8 et la figure 17, impose à l'exploitant Orano le suivi :

- des eaux du site (eaux de ruissellement, eaux de percolation de la digue, eaux du stockage, eaux de la mine à ciel ouvert, eaux de drainage) ;
- du rayonnement gamma sur et autour du site ;
- de la qualité de l'air sur et autour du site (radon et poussières) ;
- des sédiments et des végétaux aquatiques autour du site (rivière la Benaize, le Rigeallet et le Riaubrigand) ;
- de la chaîne alimentaire autour du site ;
- des eaux souterraines (au droit du site et dans l'environnement).

Les points de surveillance localisés sur la totalité de l'ancienne emprise minière sont considérés comme des points « sur site », qu'ils soient ou non à l'intérieur du périmètre de sécurité (figure 14). Par conséquent, le point de surveillance d'Orano au niveau de la zone d'activité du Cherbois (point LABO), située sur l'ancienne zone usine, est considéré comme un point « sur site ».

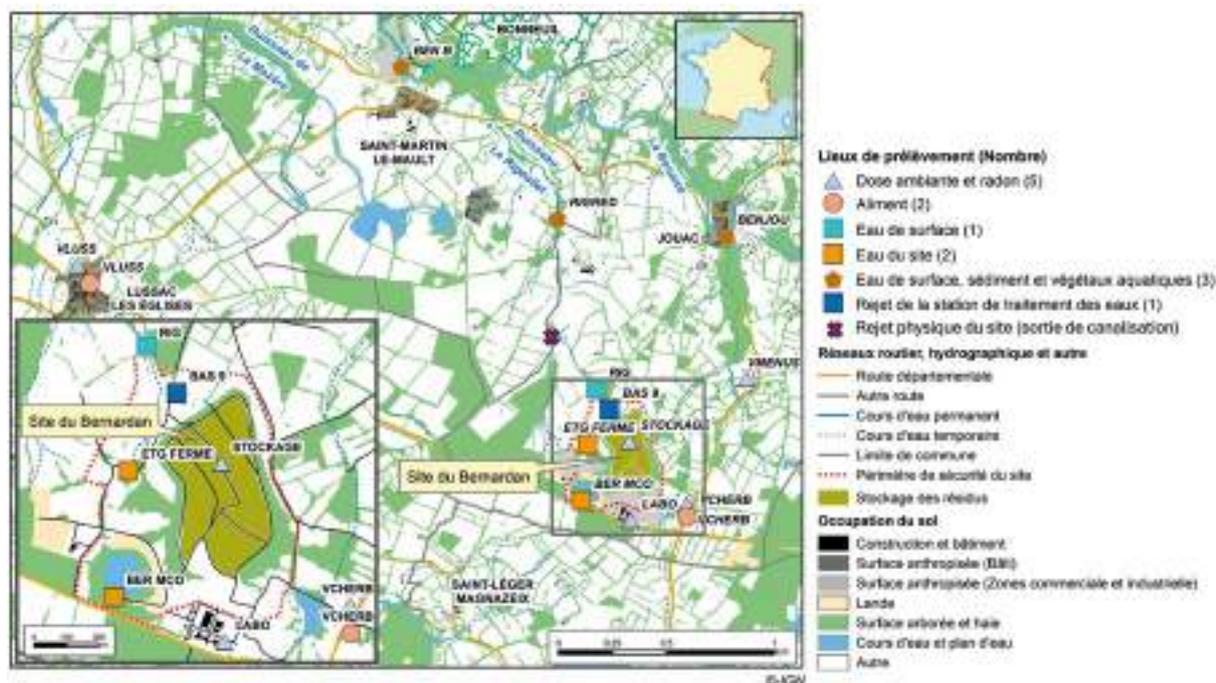
L'exploitant réalise également, de sa propre initiative, une surveillance radiologique complémentaire au niveau du village de Cherbois.

(9) Arrêté préfectoral n° 2001-503 actant la déclaration d'arrêt définitif des travaux miniers et prescrivant une surveillance radiologique de l'environnement.

(10) Arrêté préfectoral fixant à la Société des Mines de Jouac des prescriptions concernant le réaménagement du site du « Bernardan-Cherbois » à Jouac et le contrôle de l'impact radiologique du site réaménagé.

(11) Arrêté préfectoral fixant à la Société des Mines de Jouac des prescriptions additionnelles à celles du 21 mai 2002.

FIGURE 17 / LOCALISATION DES POINTS DE SURVEILLANCE D'ORANO SUR ET AUTOUR DU SITE DU BERNARDAN



Aux résultats de la surveillance de l'exploitant, s'ajoutent ceux issus de la surveillance semestrielle réalisée par l'IRSN depuis 2019 (sur les compartiments eau et sédiments) dans le cadre de sa mission de surveillance radiologique du territoire, ainsi que ceux issus des analyses ponctuelles effectuées par la Dreal Nouvelle-Aquitaine dans le cadre de contrôles inopinés.

Les résultats des mesures effectuées par Orano et mentionnées dans le tableau 8 ont été transmis et exploités dans le présent bilan à l'exception des résultats relatifs à l'énergie alpha potentielle (EAP) du radon-220 et à l'EAVL des poussières. En effet, les principaux radionucléides d'intérêt sont ceux de la chaîne de l'uranium-238 (à laquelle le radon-220 n'appartient pas) et, du fait du réaménagement, il n'y a pas d'émission de poussières.

TABLEAU 8 / MESURES RÉALISÉES SUR ET AUTOUR DU SITE DU BERNARDAN
PAR ORANO, L'IRSN ET LA DREAL

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Orano Surveillance réglementaire	Orano Autosurveillance	IRSN	Dreal
Eaux du site	<ul style="list-style-type: none"> • Au rejet (point BAS 9), mesures : <ul style="list-style-type: none"> - T°, pH, débit, MES, U soluble, ²²⁶Ra soluble, ions Ba²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻, CaCO₃, U total. Fréquence : hebdomadaire - hydrocarbures. Fréquence : semestrielle • Dans la MCO (point BER MCO), mesures : pH, U soluble, ²²⁶Ra soluble, niveau piézométrique. Fréquence : trimestrielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Aux différents points de prélèvement avant traitement (points BAS 5, BAS 6, BAS 7 et BAS 8), mesures : pH, U soluble, ²²⁶Ra soluble • Fréquence : mensuelle (hebdomadaire pour BAS 6) 		<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle inopiné (2015) : au rejet (BAS9), mesures d'U soluble et insoluble, ²²⁶Ra soluble et insoluble
Milieu aquatique	<p>Eaux : 5 points de prélèvement</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sur site : <ul style="list-style-type: none"> - au niveau de l'étang de l'ancienne ferme du Bernardan localisée à l'est du site (source du ruisseau du Rigeallet) (ETGFERME) - au niveau du ruisseau du Rigeallet, en amont du rejet mais en aval hydraulique du site (RIG) • Hors site : <ul style="list-style-type: none"> - au niveau du ruisseau du Rigeallet à l'aval du rejet, au pont des Redeaux (RIG RED) - au niveau de la rivière La Benaize, en aval de la confluence avec le ruisseau du Rigeallet (BEN B) - dans la rivière La Benaize, en amont de la confluence avec le ruisseau du Riaubrigand (BEN JOU) • Mesures : <ul style="list-style-type: none"> - pH, concentration en U soluble, activité en ²²⁶Ra soluble et insoluble (tous les points) - U total, en sulfates, CaCO₃ et HCO₃⁻ (points RIG RED, BEN B et BEN JOU) • Fréquence : <ul style="list-style-type: none"> - semestrielle au point BEN JOU - mensuelle aux autres points <p>Sédiments et bio-indicateurs (végétaux aquatiques) : 3 points de prélèvement (RIG RED, BEN B, BEN JOU)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fréquence : tous les 2 ans 		<ul style="list-style-type: none"> • Surveillance de l'environnement • Eaux : 2 points de mesure de La Benaize en amont et en aval du site (depuis 2019) • Mesures de ²³⁸U, ²³⁴U et ²³⁵U soluble, ²²⁶Ra soluble, indice d'activité α global • Sédiments : 2 points de prélèvement en amont et en aval du site (depuis 2019) • Mesures de ²³⁸U, ²³⁴U, ²³⁶U, ²³⁵U, ²²⁶Ra • Fréquence : semestrielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle inopiné (2015) • Eaux : aux points de surveillance réglementaire (RIG RED, BEN B et BEN JOU) • Mesures de : <ul style="list-style-type: none"> - U soluble et insoluble - ²²⁶Ra soluble et insoluble

TABLEAU 8 / MESURES RÉALISÉES SUR ET AUTOUR DU SITE DU BERNARDAN
PAR ORANO, L'IRSN ET LA DREAL (suite)

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Orano Surveillance réglementaire	Orano Autosurveillance	IRSN	Dreal
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> • Au niveau des piézomètres : 16 piézomètres d'abord notés H et h suivant leur profondeur, puis renommés HL ou HC pour hauteur longue ou courte de prélèvements (H1C/H1C BIS, H1L, H2C, H2L, H3C / H3C BIS, H4C / H4C BIS, H4L, H5C / H5C BIS, H5L, H6L, H7C, H8C, H9C, H10C, H11C et H12C) • Mesure : <ul style="list-style-type: none"> - pH, uranium soluble, radium-226 soluble, sulfates - Hydrocarbures depuis 2012 sur H1C/H1C BIS, H2C et H12C • Fréquence : semestrielle 			
Milieu terrestre (chaîne alimentaire)	<ul style="list-style-type: none"> • Une surveillance de la chaîne alimentaire est également réalisée dans les villages autour du site dans l'objectif d'évaluer la dose efficace annuelle ajoutée reçue par le public. • Dans l'environnement au niveau des groupes de référence : au village de Menussac (VMENUS) • Fréquence : tous les 2 ans 	<ul style="list-style-type: none"> • Dans l'environnement : au village du Cherbois (VCHERB) • Fréquence : tous les 2 ans 		
Rayonnement gamma (DTL)	<ul style="list-style-type: none"> • Sur le site : <ul style="list-style-type: none"> - sur le stockage des résidus miniers (STOCKAGE) - sur la zone d'activité du Cherbois (LABO) • Dans l'environnement proche du site : au village de Menussac (VMENUS) • Fréquence : trimestrielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Dans l'environnement : au village du Cherbois (VCHERB) 		
Air (radon-222, radon-220) et poussières	<ul style="list-style-type: none"> • Sur le site : <ul style="list-style-type: none"> - sur le stockage des résidus de traitement (Stockage) - sur la zone d'activité du Cherbois (LABO) • Dans l'environnement proche du site : au village de Menussac (VMENUS) • Fréquence : mensuelle <ul style="list-style-type: none"> - EAPv du ²²⁰Rn et ²²²Rn - EAVL 	<ul style="list-style-type: none"> • Dans l'environnement : au village du Cherbois (VCHERB) 		

Influence du site du Bernardan sur son environnement

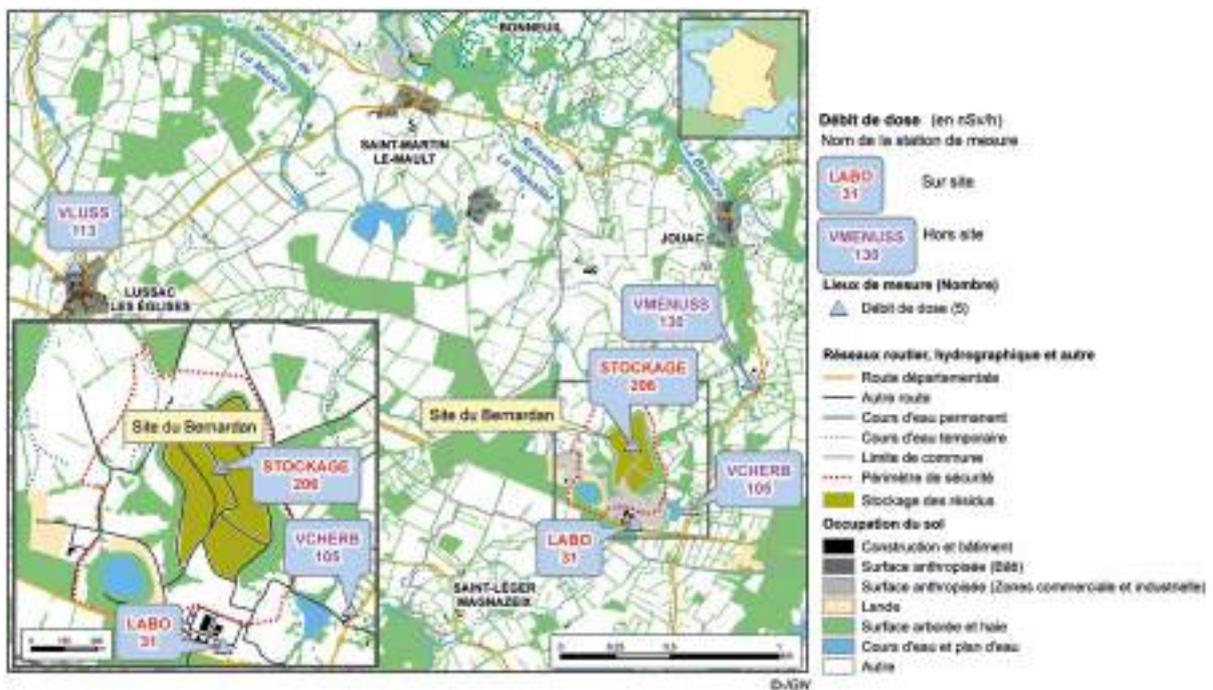
Rayonnement gamma

Pour la période 2012-2023⁽¹²⁾, le débit d'équivalent de dose moyen est de 131 et 206 nSv/h respectivement pour les deux stations de mesure localisées sur le site et de 105 et 130 nSv/h pour les deux stations localisées dans les villages environnants (figure 18). Ces valeurs sont cohérentes avec celles généralement observées sur les anciens sites miniers réaménagés et dans leur environnement. Le débit d'équivalent de dose moyen de référence, mesuré au niveau de la station dite « milieu naturel », varie quant à lui entre 80 et 160 nSv/h avec une moyenne de 113 nSv/h.

S'agissant des mesures sur site, ce sont probablement les stériles miniers constitutifs de la couverture qui sont à l'origine du débit de dose moyen le plus élevé de 206 nSv/h qui correspond presque au doublement du bruit de fond radiologique naturel moyen de 113 nSv/h.

S'agissant des mesures dans les villages environnants, la station présentant les débits d'équivalent de dose les plus élevés (moyenne de 130 nSv/h sur la période) se situe à Menussac localisé à 1 400 m environ du site (figure 18). En raison de la distance entre le point de surveillance et le site, ces débits de dose traduisent la variabilité naturelle du bruit de fond local (chapitre 1). C'est également le cas au village du Cherbois (VCHERB) où les débits d'équivalent de dose (moyenne de 105 nSv/h sur la période) sont inférieurs à la gamme observée sur la station « milieu naturel ».

FIGURE 18 / MOYENNE 2012-2023 DES DÉBITS D'ÉQUIVALENT DE DOSE MESURÉS PAR ORANO SUR ET AUTOUR DU SITE DU BERNARDAN (nSv/h)



(12) Données 2023 disponibles jusqu'en juin.

Énergies alpha potentielles (EAP) du ²²²Rn

Toutes les stations de mesure de l'EAP du ²²²Rn se trouvent, selon Orano, en position sommitale et sont localisées sur de mêmes formations géologiques. Les résultats de mesure peuvent par conséquent être comparés les uns aux autres.

Pour la période 2012-2022, les mesures de l'EAP du ²²²Rn sur et autour du site varient dans une gamme de 8 à 138 nJ/m³. Sur cette période, l'EAP du ²²²Rn moyen est de l'ordre de 40 nJ/m³ pour les deux stations de mesure localisées sur le site et de 38 et 45 nJ/m³ pour celles localisées dans les villages environnants (figure 19). L'EAP du ²²²Rn mesuré au niveau de la station dite « milieu naturel »⁽¹³⁾ varie quant à elle entre 12 et 138 nJ/m³ avec une moyenne de 50 nJ/m³ sur la période (figure 19). Il n'y a donc pas d'influence visible du site sur l'EAP du ²²²Rn au niveau des villages environnants.

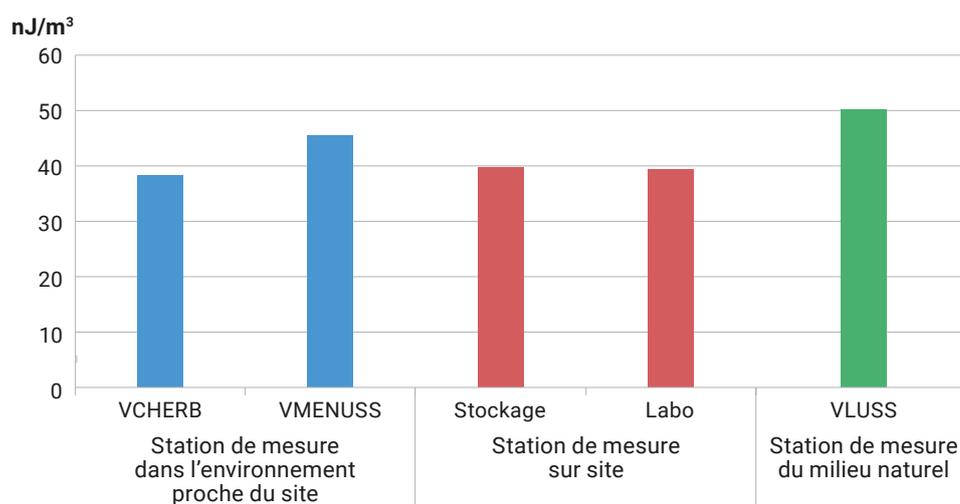
Les eaux de surface

Les moyennes des concentrations en uranium et des activités en radium-226 mesurées dans les eaux de l'environnement, les eaux du rejet (au point BAS 9) et l'eau de la MCO sur la période 2012-2022 sont affichées sur la carte de la figure 20.

S'agissant du ruisseau du Rigeallet, la moyenne, sur la période 2012-2022, des concentrations en uranium mesurées au point RIG RED en aval du rejet, est de 181 µg/L alors qu'elle est de 51 µg/L au point RIG au droit du site, en amont du rejet.

La moyenne sur la période 2012-2022 des activités de radium-226 mesurées, est de 71 mBq/L au point RIG RED et deux fois plus élevée au point RIG en aval hydraulique du site mais en amont du point de rejet dans le cours d'eau (157 mBq/L). Toutefois, l'écart entre l'activité en radium-226 dans le Rigeallet entre l'amont (RIG) et l'aval immédiat du rejet (RIG RED) tend à diminuer depuis 2016 comme la montre la figure 21.

FIGURE 19 / MOYENNE 2012-2022 DES MESURES DE L'EAP DU ²²²RN (nJ/m³) RÉALISÉES PAR ORANO AU NIVEAU DES STATIONS LOCALISÉES SUR LE SITE DU BERNARDAN, DANS SON ENVIRONNEMENT PROCHE ET AU NIVEAU DE LA STATION DITE « MILIEU NATUREL »



(13) Localisée au village de Lussac-les-Églises.

FIGURE 20 / MOYENNE DES TENEURS EN URANIUM ET EN RADIUM-226 MESURÉES ENTRE 2012 ET 2022

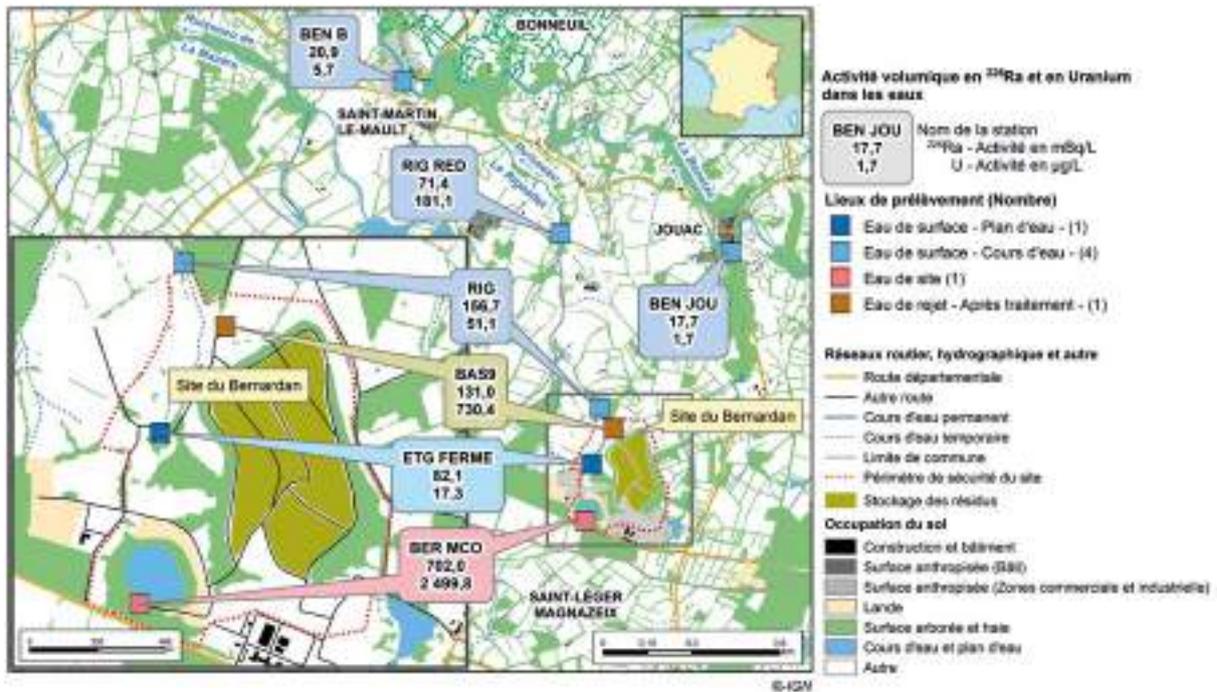
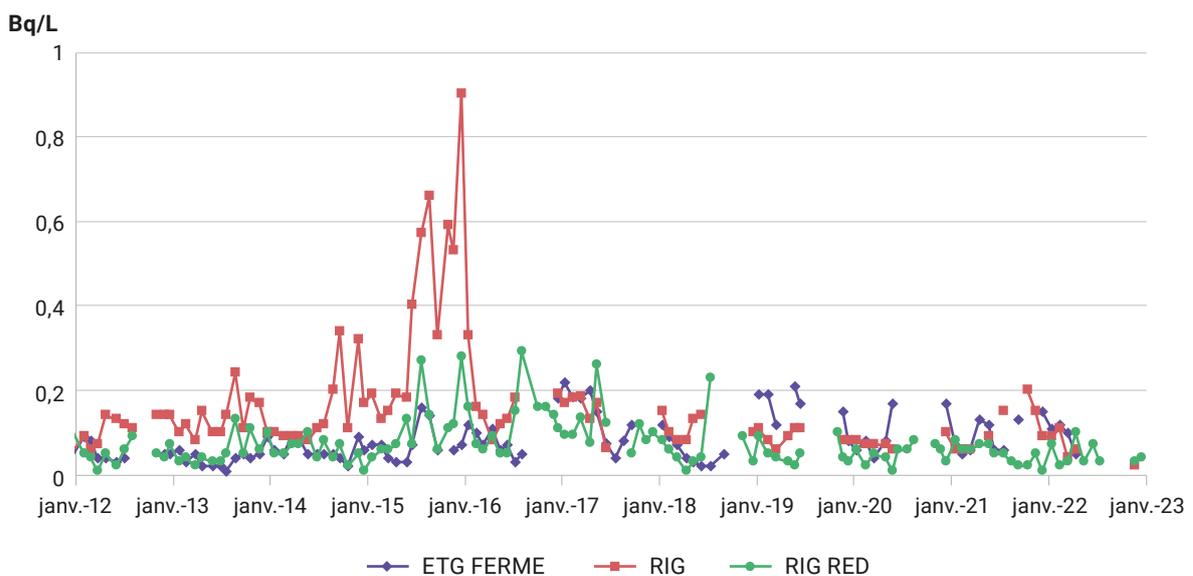


FIGURE 21 / ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN RADIUM-226 SOLUBLE DANS LES EAUX DU RUISSEAU DU RIGALLET (Bq/L)



La moyenne sur la période 2012-2022 au niveau de l'étang de l'ancienne ferme du Bernardan (ETG FERME), situé à l'extrême amont hydraulique du Rigeallet est de 17 µg/L pour l'uranium et 82 mBq/L pour le radium-226. Ces données sont difficilement interprétables du fait du peu, voire de l'absence régulière, d'eau dans l'étang qui a tendance à s'envaser ainsi qu'au point RIG.

S'agissant de la Benaize, la moyenne des concentrations en uranium sur la période 2012-2022 est de 1,7 µg/L en amont et trois fois plus élevée au point aval BEN B (5,7 µg/L).

Concernant le radium-226, l'écart entre l'amont et l'aval n'est pas significatif du fait que 50 à 60 % des valeurs mesurées sont inférieures au seuil de décision.

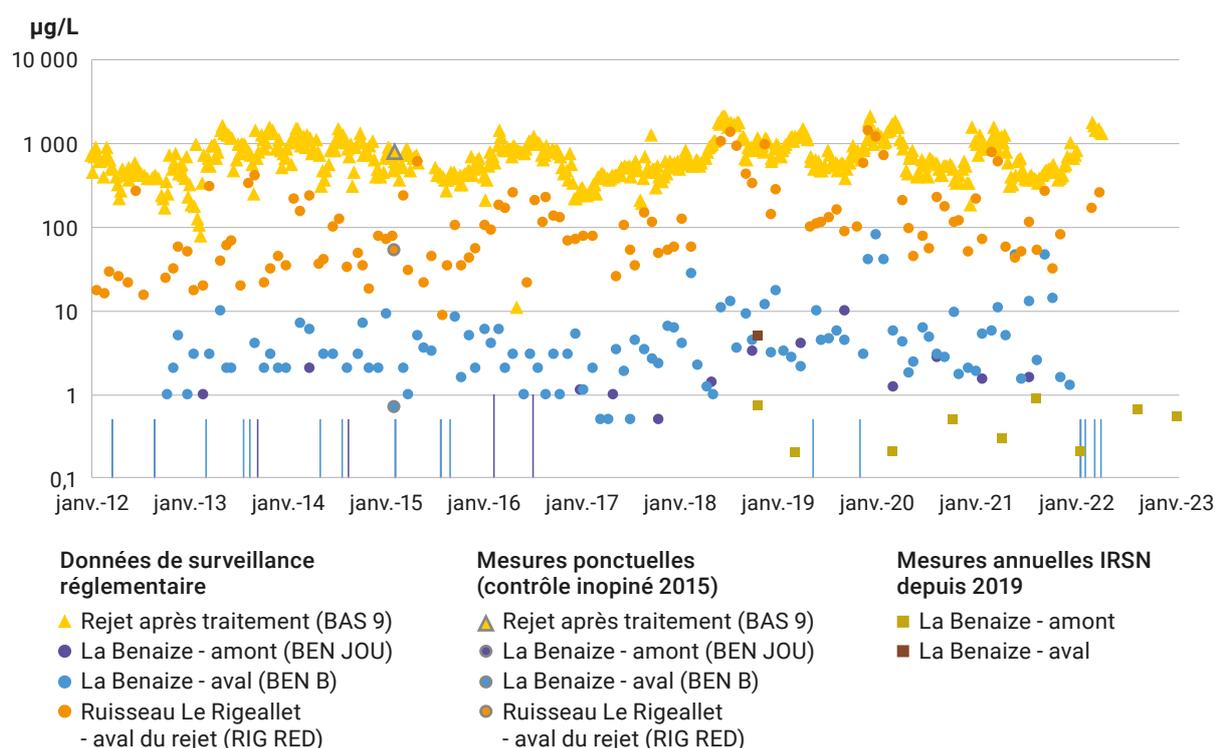
Les résultats des mesures réalisées en amont et en aval du site par l'IRSN depuis 2019, à proximité des points de prélèvement BEN JOU et BEN B respectivement, montrent des concentrations en uranium du même ordre de grandeur que celles présentées par Orano (0,5 µg/L en moyenne en amont et une seule mesure en 2019 d'une concentration de 4,8 µg/L en aval) et une activité en radium-226 sous les seuils de décision pour les 9 valeurs mesurées en amont et l'unique valeur mesurée en aval.

Les chroniques des mesures en uranium et en radium-226 sur la période 2012-2022 dans le Rigeallet, la Benaize et le rejet sont présentées dans la figure 22 et la figure 24 respectivement.

Pour ce qui concerne l'uranium (figure 22), les concentrations mesurées au niveau de la Benaize en aval du site (BEN B) sont globalement plus élevées que celles mesurées en amont (BEN JOU), cela indépendamment du producteur de la donnée (Dreal, IRSN ou Orano). Ainsi les concentrations en uranium au point BEN B varient entre 0,5 et 80,0 µg/L tandis qu'elles varient entre 0,5 et 10,0 µg/L au niveau du point BEN JOU.

Des pics en uranium sont observés aux mêmes périodes aux points RIG RED (aval rejet) et BEN B (Benaize aval) ; ils sont concomitants à des pics relevés au niveau du rejet (BAS 9). Ainsi, à titre d'illustration, entre juin et août 2020, la concentration en uranium varie entre 970 et 2 120 µg/L au rejet (BAS 9), entre 730 et 1 440 µg/L dans le Rigeallet en aval du rejet (RIG RED) et entre 40 et 80 µg/L au niveau de BEN B, dans la Benaize en aval de la confluence avec le Rigeallet. Ces pics s'expliquent par l'apport supplémentaire des eaux de la MCO dans le circuit de la station de traitement des eaux (station de pompage mise en service en 2018).

FIGURE 22 / CONCENTRATION DE L'URANIUM MESURÉE ENTRE 2012 ET 2022 DANS LES EAUX DE REJET, DU RIGEALLET ET DE LA BENAIZE (µg/L)



Ces pics ne sont pas observables aux points RIG et ETG FERME en raison de l'absence d'eau aussi bien au niveau du Rigeallet (point RIG) qu'au niveau de l'étang de la ferme (ETG FERME) (figure 23).

Pour ce qui concerne le radium-226 (figure 24), les activités mesurées varient entre 10 et 1 000 mBq/L au niveau du rejet du site (BAS 9), entre 10 et 290 mBq/L dans le Rigeallet en aval du rejet (RIG RED).

Les activités en radium-226 varient entre 10 et 90 mBq/L (avec une valeur maximale de 250 mBq/L en 2016) au niveau de BEN B, dans la Benaize en aval de la confluence avec le Rigeallet et enfin entre 10 et 60 mBq/L au niveau de BEN JOU, en amont de la confluence avec le Riaubrigand. Il est par ailleurs à noter que sur ces points, 52 % des valeurs pour BEN B et 59 % pour BEN JOU sont inférieures à la limite de détection.

En complément, la figure 25 présente l'évolution des moyennes annuelles des concentrations en uranium et des activités en radium-226 mesurées dans les eaux des différents bassins sur la période 2012-2023. Celle-ci montre que le traitement des eaux permet d'abaisser la concentration en uranium et l'activité en radium-226 dans les eaux traitées (bassin B9) et de respecter les valeurs réglementaires de rejet. Ainsi, pour la période 2012-2022, la concentration moyenne est de 730 µg/L pour l'uranium et de 131 mBq/L pour le radium-226 dans le rejet (figure 20).

Les eaux du site présentant les teneurs les plus élevées en uranium et en radium-226 sont les eaux du stockage (collectées au niveau du bassin B6 jusqu'en juillet 2015 puis au niveau du bassin B5). À cet égard, on remarque que l'abattement, c'est-à-dire l'écart entre les teneurs en radium-226 dans les eaux traitées (bassin B9) et celles dans les eaux issues du stockage (bassin B6 jusqu'en 2015 puis bassin B5 depuis), est plus faible avant 2015 qu'après, le plus faible écart étant observé en 2014. Le faible abattement en radium-226 observé en 2014 s'explique par la suspension du traitement au chlorure de baryum, décidé par Orano en 2013 du fait d'activités en radium-226 inférieures à la valeur réglementaire de rejet. Toutefois, ayant constaté une augmentation des activités en radium-226 après la suspension du traitement au chlorure de baryum, avec des valeurs (maximum de 1 000 mBq/L en moyenne hebdomadaire) dépassant ponctuellement la valeur moyenne annuelle réglementaire de rejet (740 mBq/L), Orano a remis en œuvre le traitement en 2016.

Enfin, la concentration moyenne des eaux de la MCO sur la période 2012-2022 est de 2 500 µg/L pour l'uranium et 702 mBq/L pour le radium-226 (figure 20). Les chroniques de mesure montrent que les valeurs moyennes annuelles varient peu.

FIGURE 23 / ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN U SOLUBLE DANS LES EAUX DU RUISSEAU DU RIGEALLET EN AVAL DU REJET DE LA STATION (mg/L)

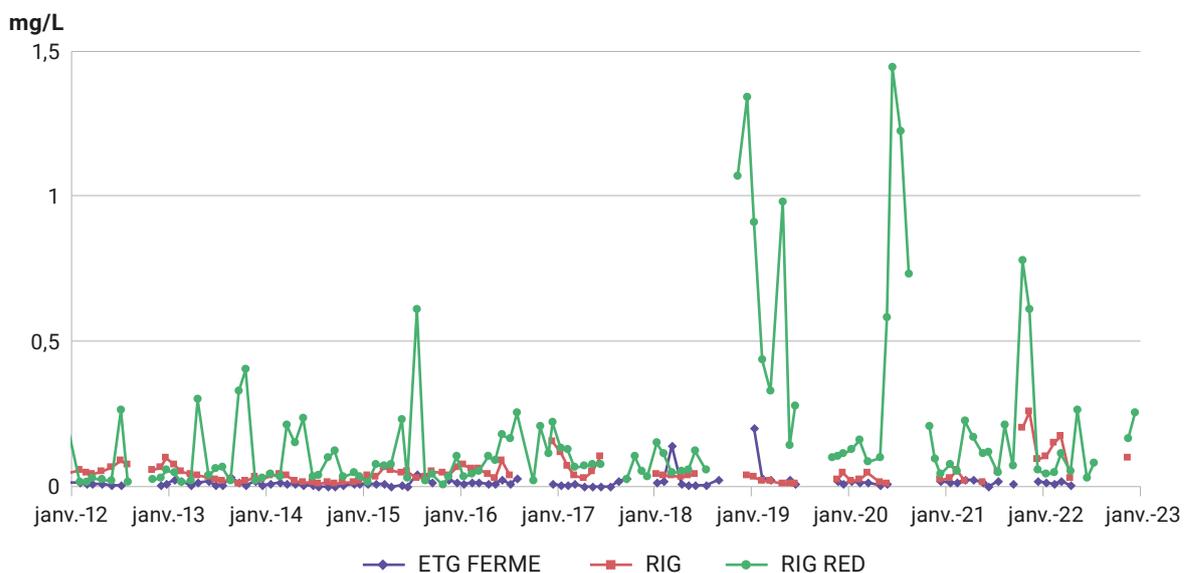
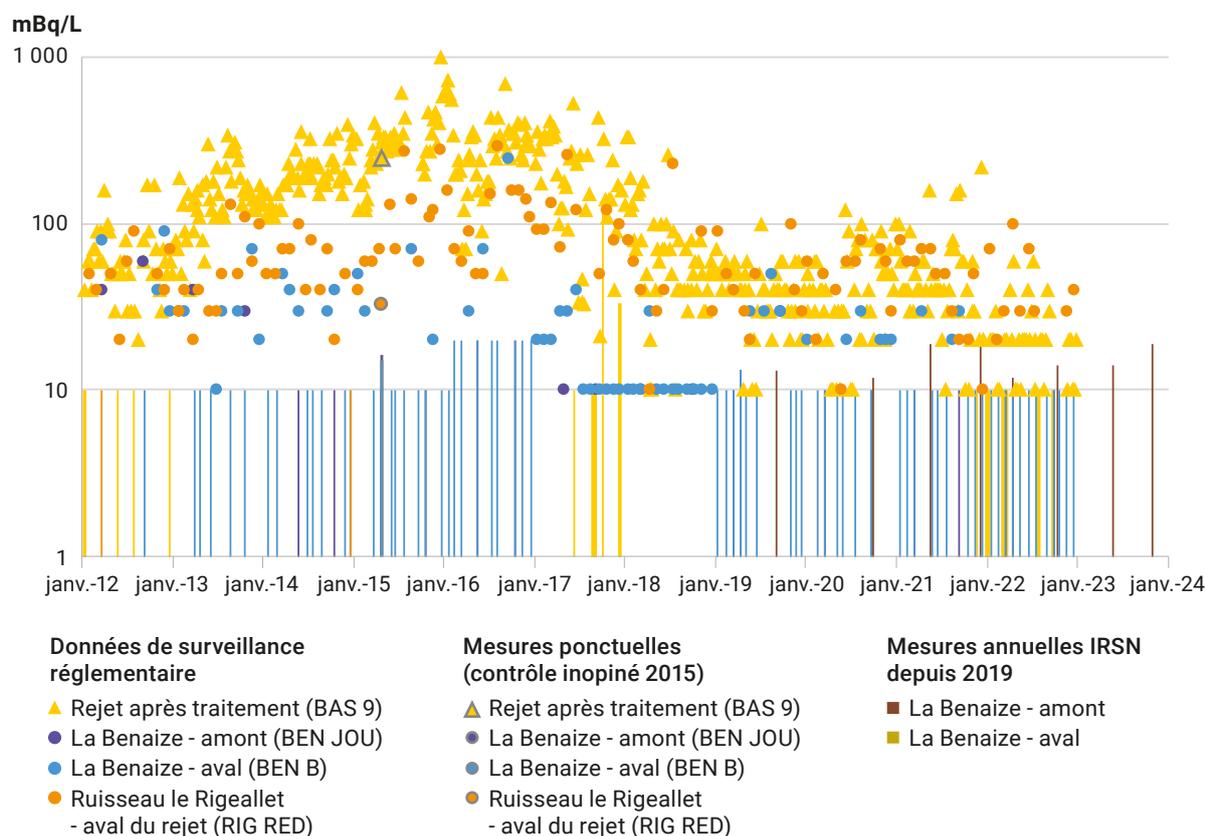


FIGURE 24 / ACTIVITÉ DU RADIUM-226 MESURÉE ENTRE 2012 ET 2022 DANS LES EAUX DE REJET, DU RIGEALLET ET DE LA BENAIZE (mBq/L)



Les sédiments

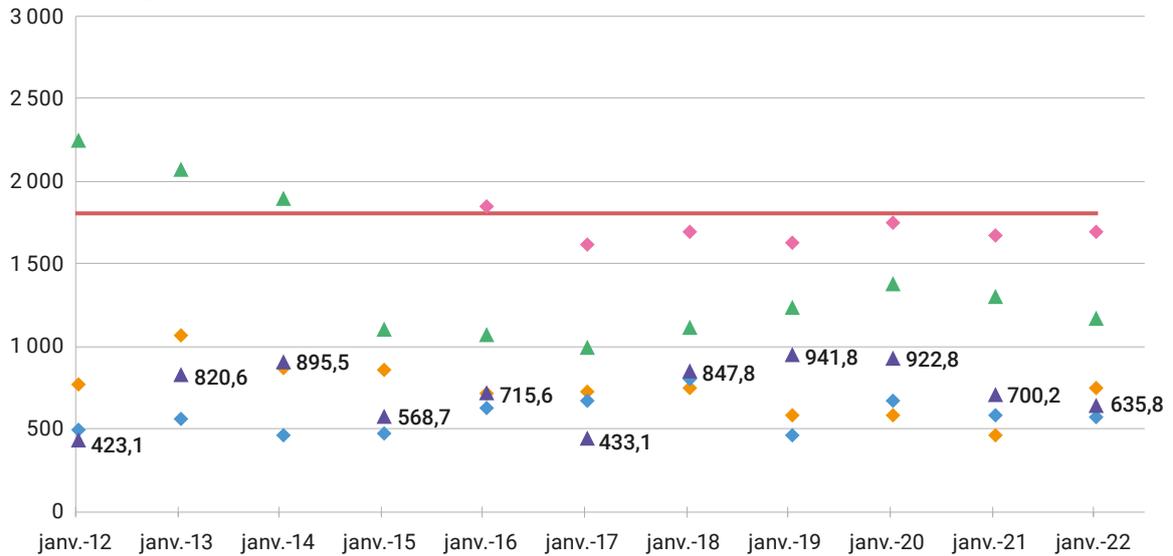
Le tableau 9 présente l'ensemble des résultats disponibles concernant les teneurs en uranium-238 et en radium-226 dans les sédiments. Il est à noter que le manque de connaissances des caractéristiques des échantillons (nature et granulométrie) rend délicate l'interprétation des résultats. Par conséquent, compte tenu du faible nombre d'échantillons ne permettant pas d'avoir un jeu de données suffisamment dense pour extraire des statistiques, les moyennes présentées au tableau 9 ne peuvent être considérées qu'à titre indicatif.

Entre 2008 et 2022, les activités moyennes en uranium-238 sont plus élevées aux points situés en aval du site du Bernardan (point RIG RED situé au niveau du rejet physique du site et point BEN B situé en aval du site) qu'au point BEN JOU, situé hors de l'influence du Rigeallet.

Concernant le radium-226, l'activité moyenne est, au contraire, plus élevée au point amont de la confluence avec le Riaubrigand (BEN JOU), qu'aux points en aval du rejet du Bernardan (RIG RED et BEN B).

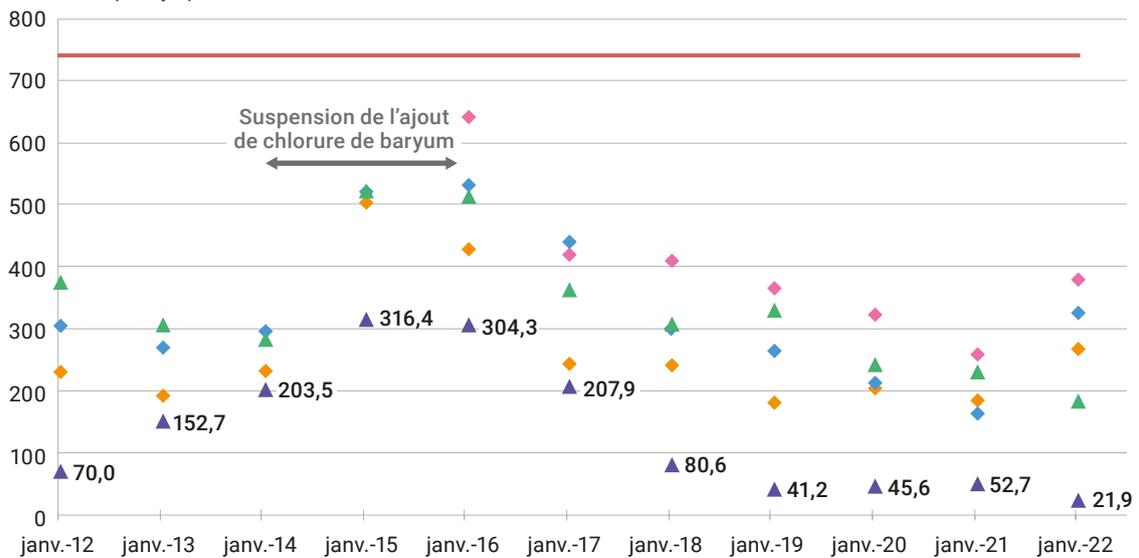
FIGURE 25 / MOYENNES ANNUELLES DES CONCENTRATIONS EN URANIUM-238 ($\mu\text{g/L}$) ET DES ACTIVITÉS EN RADIUM-226 (mBq/L) DES EAUX PRÉLEVÉES DANS LES DIFFÉRENTS BASSINS SUR LA PÉRIODE 2012-2023

Uranium-238 ($\mu\text{g/L}$)



- Valeur réglementaire moyenne annuelle de rejet
- ◆ BAS 5 (eaux d'exhaure du stockage) à partir de 2016
- ▲ BAS 6
- ◆ BAS 7 (eaux côté est stockage)
- ◆ BAS 8 (eaux de ruissellement et de percolation digue)
- ▲ BAS 9 rejet

Radium-226 (mBq/L)



- Valeur réglementaire moyenne annuelle de rejet
- ◆ BAS 5 (eaux d'exhaure du stockage) à partir de 2016
- ▲ BAS 6
- ◆ BAS 7 (eaux côté est stockage)
- ◆ BAS 8 (eaux de ruissellement et de percolation digue)
- ▲ BAS 9 rejet

TABLEAU 9 / ACTIVITÉS MASSIQUES EN URANIUM-238 ET EN RADIUM-226 DANS LES SÉDIMENTS DE LA RIVIÈRE LA BENAIZE ET DU RUISSEAU LE RIGEALLET ENTRE 2008 ET 2022 (Bq/kg sec)

Cours d'eau	Localisation des prélèvements	Surveillance Orano 2008-2022*		Surveillance de l'environnement IRSN 2019-2023**	
		²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³⁸ U	²²⁶ Ra
Le Rigeallet, en aval du rejet	Au pont des Redeaux (point RIG RED)	Moyenne : 616 sur 5 prélèvements entre 2008 et 2022 [min : 160 ; max : 1 400]	Moyenne : 74 sur 5 prélèvements entre 2008 et 2022 [min : 30 ; max : 130]	-	-
	En amont de la confluence avec le ruisseau le Riaubrigand (point BEN JOU)	Moyenne : 82 sur 6 prélèvements entre 2008 et 2022 [min : 40 ; max : 138]	Moyenne : 85 sur 6 prélèvements entre 2008 et 2022 [min : 30 ; max : 160]		
La Benaize amont	À Jouac, proche BEN JOU (point Benaize amont)			Moyenne : 72 sur 8 prélèvements entre 2019 et 2023 [min : 23 ; max : 183]	Moyenne : 36 sur 8 prélèvements entre 2019 et 2023 [min : 14 ; max : 98]
	En aval de la confluence entre 2008 et 2022 le Rigeallet (point BEN B)	Moyenne : 141 sur 7 prélèvements entre 2008 et 2022 [min : <25 ; max : 410]	Moyenne : 58 sur 7 prélèvements entre 2008 et 2022 [min : 30 ; max : 98]	-	-
La Benaize aval	Au Moulin de Saint-Martin, proche BEN B (point Benaize aval)			Moyenne : 84 sur 8 prélèvements entre 2019 et 2023 [min : 37 ; max : 250]	Moyenne : 25 sur 8 prélèvements entre 2019 et 2023 [min : 15 ; max : 52]

* Prélèvements effectués depuis 2008, environ une fois tous les 2 ans (2008, 2010, 2013, 2015, 2017, 2020 et 2022), pas d'information sur la granulométrie de l'échantillon.

** Prélèvements effectués depuis 2019, deux fois par an, sur échantillon < 200 µm sauf en avril et août 2019 (échantillon entier).

La chaîne alimentaire

Les figures 26 et 27 montrent que les résultats des mesures d'activités massiques d'uranium-238 et de radium-226 dans les denrées prélevées autour du site ne sont pas distinguables de ceux des denrées prélevées au niveau du village de référence de Lussac-les-Églises qu'il s'agisse de valeurs significatives ou inférieures au seuil de décision (on note que les seuils de décisions liés aux moyens métrologiques mis en œuvre sont appropriés pour la surveillance requise). De plus, tous ces résultats se situent dans la gamme de variabilité des activités habituellement mesurées sur des zones à haut niveau de radioactivité naturelle (chapitre 1, p. 27).

Les figures 28 et 29 présentent les activités en uranium-238 et en radium-226 respectivement mesurées dans l'eau de boisson autour du site et les comparent à celles mesurées au niveau du village de référence de Lussac-les-Églises.

Les résultats en uranium-238 sont compris entre 0,02 et 0,06 Bq/L, ce qui est du même ordre de grandeur que pour l'eau de boisson prélevée dans le milieu naturel de référence avec des valeurs comprises entre 0,01 et 0,05 Bq/L.

Les résultats en radium-226 sont compris entre 0,04 et 0,08 Bq/L dans l'environnement proche du site du Bernardan soit deux fois plus élevés que les résultats obtenus à Lussac-les-Églises (entre 0,01 et 0,03 Bq/L).

Les résultats de mesures radiologiques des échantillons environnementaux prélevés dans le cadre de la surveillance ne mettent pas en évidence d'influence du site du Bernardan dans les différents compartiments (air, eau, sols, chaîne alimentaire) de l'environnement.

FIGURE 26 / ACTIVITÉS DE L'URANIUM-238 DE DIVERSES DENRÉES AUTOUR DU SITE DU BERNARDAN ET DANS LE MILIEU NATUREL (Bq/kg frais)

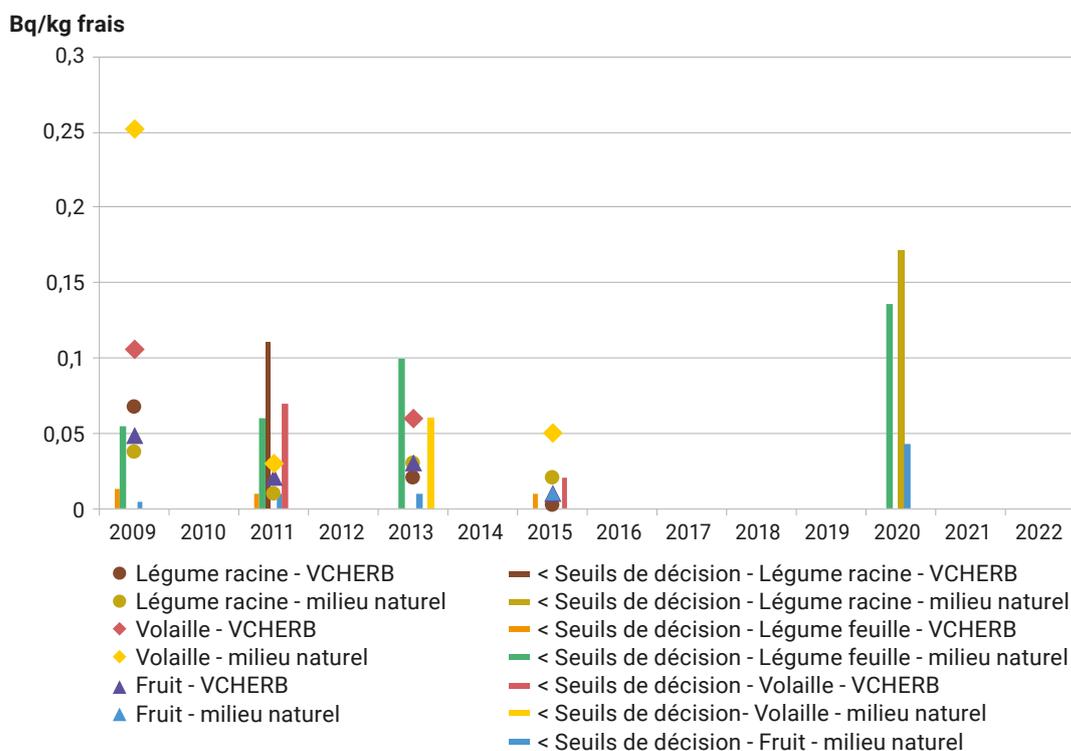


FIGURE 27 / ACTIVITÉS DU RADIUM-226 DE DIVERSES DENRÉES AUTOUR DU SITE DU BERNARDAN ET DANS LE MILIEU NATUREL (Bq/kg frais)

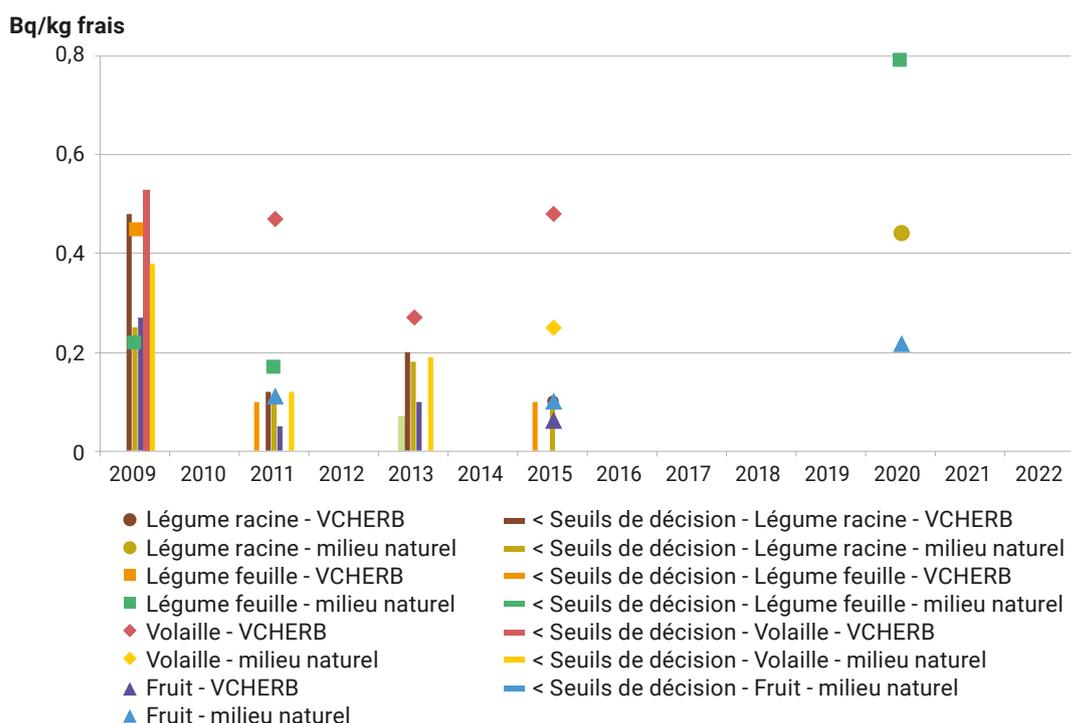


FIGURE 28 / ACTIVITÉ DE L'URANIUM-238 DANS L'EAU DE BOISSON (Bq/L)

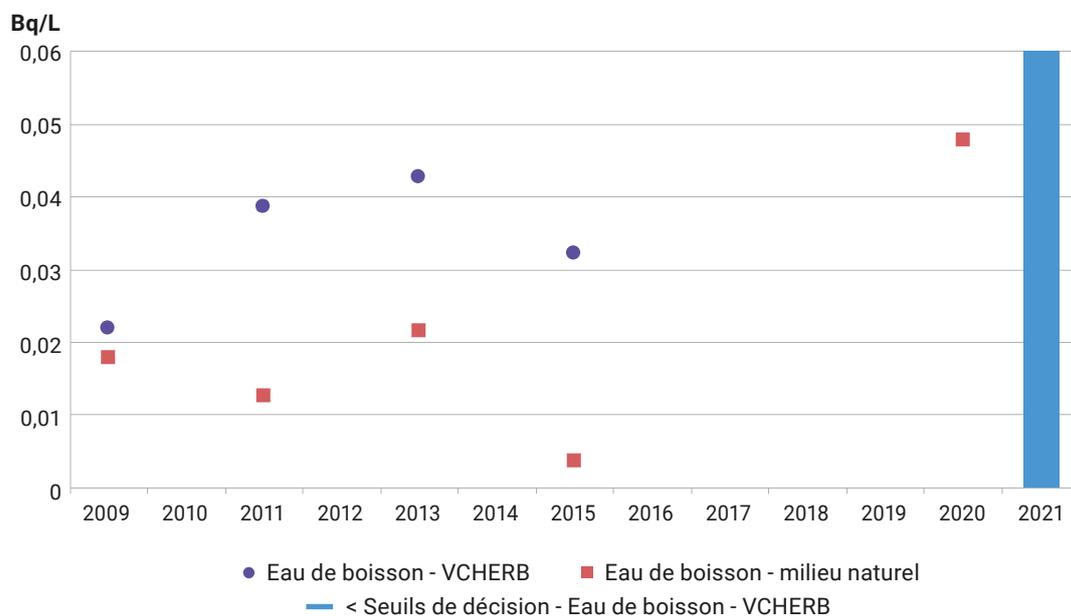
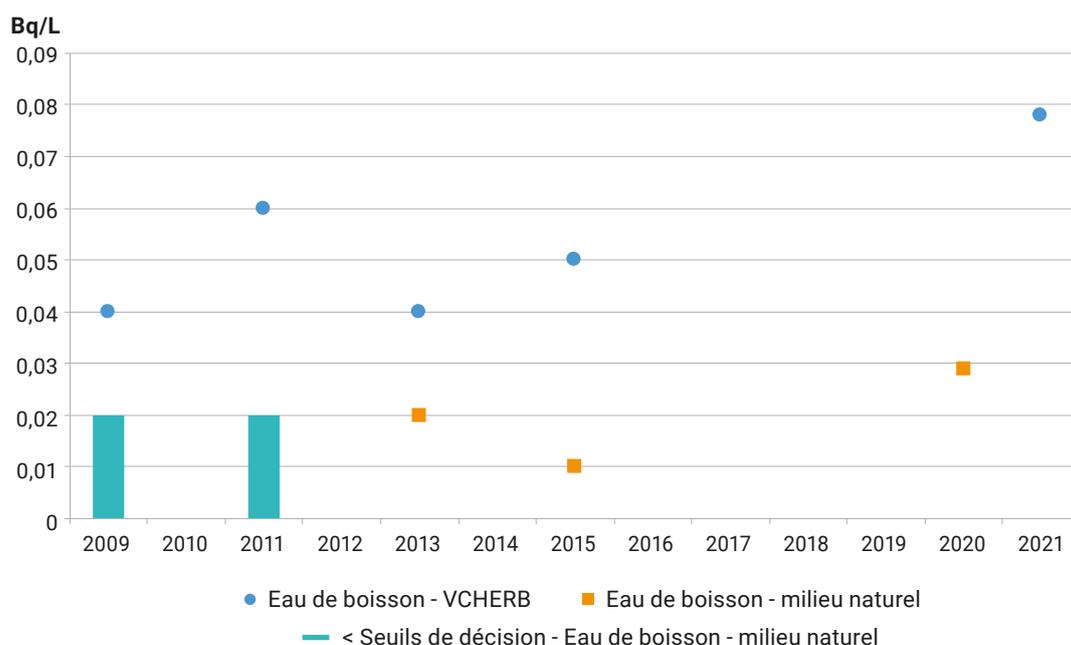


FIGURE 29 / ACTIVITÉS DU RADIUM-226 DANS L'EAU DE BOISSON (Bq/L)



Mesure *in situ* (spectrométrie gamma et débit de dose).



© Vincent Malfait/Médiathèque IRSN



04

ÉLÉMENTS D'ACTUALITÉ SUR LA PÉRIODE 2021-2023

- 4.1. SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ EN UKRAINE 304
- 4.2. INCIDENT DANS LE SOUS-MARIN « PERLE » À TOULON
EN SEPTEMBRE 2022 305
- 4.3. INCIDENT À L'USINE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE
EN SEPTEMBRE 2022 306
- 4.4. DÉTECTION DE COBALT-60 SUR UN ÉCHANTILLON
D'AÉROSOLS PRÉLEVÉ PAR LA STATION OPERA-AIR
DE L'IRSN DU CNPE D'EDF DE CIVAUX (VIENNE) EN 2023 307
- 4.5. SINGULARITÉ RADIOLOGIQUE D'ORIGINE NATURELLE
DANS LES SABLES DE LA PLAGE DE TRÉBÉZY
ET DE SES ENVIRONS 308
- 4.6. INCIDENT RADIOLOGIQUE À L'ACIÉRIE LME
DE TRITH-SAINT-LÉGER 310
- 4.7. ÉPISODE DE SABLES SAHARIENS SUR LA FRANCE
DE FÉVRIER 2021 ET DE SEPTEMBRE 2023 311

04

ÉLÉMENTS D'ACTUALITÉ SUR LA PÉRIODE 2021-2023

4.1. SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ EN UKRAINE

L'Ukraine compte 15 réacteurs de production d'électricité de conception russe, ainsi que des réacteurs de recherche et des sites d'entreposage et de stockage de sources radioactives et de déchets (dont le site de Tchernobyl, figure 1). Suite à l'invasion de l'Ukraine par la Russie le 24 février 2022, l'IRSN a mobilisé son organisation de crise afin de suivre la situation sur place et l'état des installations nucléaires ukrainiennes. Les travaux menés par l'IRSN dans son Centre technique de crise concernent principalement la veille de l'état radiologique sur le territoire ukrainien et dans les territoires limitrophes, l'évaluation des

risques pour les installations nucléaires ukrainiennes et enfin l'information du public. La surveillance des niveaux de radioactivité s'appuie notamment sur les données de balises automatiques qui mesurent la radioactivité ambiante dans l'air (débit d'équivalent de dose gamma ambiant). Deux installations ont particulièrement été étudiées par l'IRSN : le site de Tchernobyl au nord et la centrale nucléaire de Zaporizhzhia au sud (la plus puissante centrale d'Europe avec 6 réacteurs).

L'ensemble du travail réalisé par l'IRSN dans ce cadre, dont un dossier dédié et des notes d'information produites en 2022 et 2023, est consultable sur son site internet à l'adresse suivante : <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/crise/situation-installations-nucleaires-ukraine>

FIGURE 1 / CARTE DE SITUATION DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES MAJEURES D'UKRAINE



4.2. INCIDENT DANS LE SOUS-MARIN « PERLE » À TOULON EN SEPTEMBRE 2022

Le plan d'urgence interne (PUI) de la base navale de Toulon a été déclenché le lundi 26 septembre 2022 à la suite d'un départ de feu, sans flamme apparente, lié à la combustion de matériaux isolants dans un compartiment destiné au stockage de vivres sur le sous-marin nucléaire d'attaque (SNA) « Perle ». L'IRSN, a instantanément activé son organisation de crise et son centre technique de crise (CTC), afin de suivre l'évolution de la situation en relation régulière avec l'exploitant.

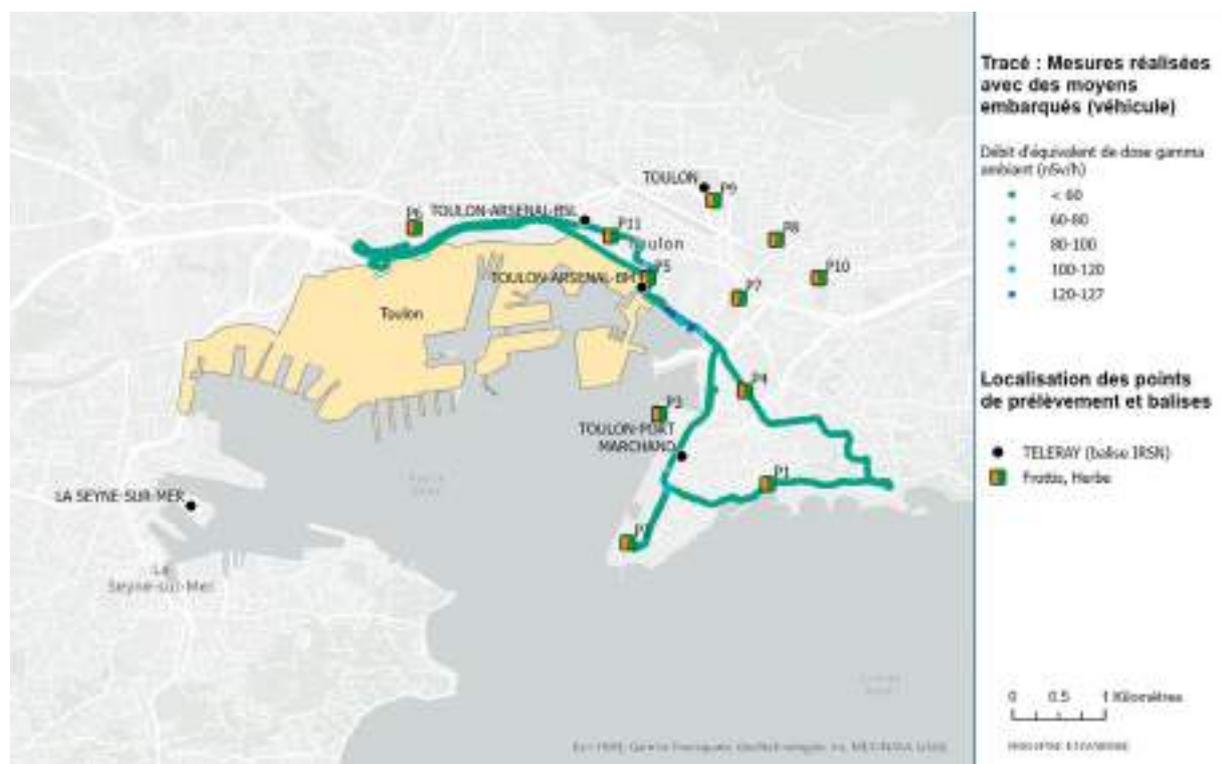
En accord avec l'Autorité de sûreté nucléaire de défense (ASND) et la préfecture du Var, l'IRSN a dépêché sur place, le 26 septembre 2022, des experts et des moyens spécialisés afin de confirmer l'absence de rejets liés à l'événement dans l'environnement autour de la base navale.

L'IRSN a réalisé, en collaboration avec le Service départemental d'incendie et de secours (SDIS) du Var, des mesures directes de débit de dose gamma ambiant et de contamination surfacique des sols, des prélèvements d'herbe et des frottis, à proximité immédiate du site dans la zone située sous le vent au moment de l'événement (figure 2). L'IRSN a également relevé le filtre de son réseau de surveillance OPERA-Air, situé à La Seyne-sur-Mer. Les prélèvements ont été acheminés les 27 et 28 septembre 2022 vers les laboratoires de l'IRSN en région Provence-Alpes-Côte d'Azur et en région parisienne pour y être analysés.

L'ensemble des résultats des mesures directes et des analyses des prélèvements effectués ont permis de confirmer l'absence de marquage de l'environnement à proximité du site lié à l'événement.

À l'occasion de cet incident, l'IRSN a publié une note d'information consultable sur son site internet à l'adresse suivante : https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/actualites_presse/actualites/IRSN_NI_Incident-Base-navale-Toulon-Perle_20220930.pdf

FIGURE 2 / CARTOGRAPHIE DU DÉBIT D'ÉQUIVALENT DE DOSE GAMMA AMBIANT ET LOCALISATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT AUX ABORDS DE LA BASE NAVALE DE TOULON (septembre 2022)



4.3. INCIDENT À L'USINE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE EN SEPTEMBRE 2022

Le mercredi 21 septembre 2022, en fin d'après-midi, le plan d'urgence interne du site Framatome de Romans-sur-Isère a été déclenché à la suite d'un incendie dans un atelier contenant de l'uranium. L'installation dans laquelle s'est déclaré l'incendie assure la fabrication d'éléments combustibles pour les réacteurs de recherche et de cibles d'irradiation pour la production d'isotopes destinés à la médecine nucléaire. Le local concerné abrite des matières uranifères sous forme de poudre, manipulées dans une boîte à gant ventilée et sous forme solide, placées dans des étuves. L'IRSN a rapidement activé son organisation de crise et mobilisé les experts et moyens de son centre technique de crise, afin d'évaluer la situation et les risques associés pour la population et l'environnement.

Après avoir maîtrisé l'incendie, l'exploitant a indiqué que les mesures réalisées dans les locaux et au niveau de la cheminée de l'installation n'avaient pas mis en évidence de dissémination de matières radioactives.

En accord avec la préfecture de la Drôme, l'IRSN a dépêché ses moyens mobiles le 22 septembre en début de matinée pour effectuer des prélèvements et mesures dans l'environnement proche de l'usine (figure 3).

Les premières mesures directes de contamination radioactive et de débit de dose gamma ambiant réalisées sur place jeudi 22 septembre n'ont révélé aucune trace de radioactivité anormale. L'IRSN a ensuite analysé dans ses laboratoires les échantillons prélevés à proximité immédiate du site (aérosols atmosphériques, herbe, sol et frottis). Ces investigations complémentaires ont permis de confirmer l'absence de marquage radiologique de l'environnement lié à l'incident.

À l'occasion de cet incident, l'IRSN a publié deux notes d'information consultables sur son site internet. La dernière présentant les résultats de mesure est disponible à l'adresse suivante : https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/actualites_presse/actualites/IRSN_NI_Incident-Framatome-Romans-sur-Isere_20220923.pdf

FIGURE 3 / LOCALISATION DES PRÉLÈVEMENTS ET MESURES DIRECTES



4.4. DÉTECTION DE COBALT-60 SUR UN ÉCHANTILLON D'AÉROSOLS PRÉLEVÉ PAR LA STATION OPERA-AIR DE L'IRSN DU CNPE D'EDF DE CIVAUX (VIENNE) EN 2023

En janvier 2023, dans le cadre de la surveillance radiologique du compartiment atmosphérique, le service de métrologie de l'IRSN a mesuré significativement du cobalt-60 dans un échantillon d'aérosols prélevé par la station OPERA-AIR du CNPE de Civaux, sur la période du 9 au 16 janvier 2023, à une activité de $22,3 \pm 3 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air. Aucun autre radionucléide artificiel n'a été quantifié sur ce premier comptage. Si le cobalt-60 est régulièrement mesuré dans les aérosols collectés à proximité des CNPE, une telle activité volumique n'avait pas été observée à un tel niveau depuis la quantification d'une activité de $54,3 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air en 2018 au voisinage du CNPE de Gravelines (chapitre 2.1, figure 7).

Compte tenu de cette première mesure, un second comptage, sur une période plus longue, a été réalisé afin d'abaisser les seuils de décision. Ce second comptage a permis de confirmer le niveau d'activité précédemment observé de cobalt-60 et de quantifier également une activité significative de manganèse-54 (tableau 1). Aucun autre radionucléide artificiel n'a été quantifié. Par ailleurs, le second comptage sur une période plus longue du filtre de la période précédente (2 au 9 janvier) a montré également la présence de cobalt-60. Néanmoins, l'activité mesurée était trop proche de la valeur du seuil de décision ($0,5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) pour qu'elle puisse être quantifiée.

Sur la même période, EDF a déclaré un évènement significatif en radioprotection le 13 janvier 2023 (ESINB-BDX-2023-0049) pour une suite d'évènements du 7 au 10 janvier qui ont conduit à des augmentations d'activités volumiques aux abords d'un chantier de contrôle périodique des tubes de deux générateurs de vapeur dans le bâtiment réacteur de l'unité n° 2 alors en maintenance programmée.

Cet évènement et l'analyse des conditions météorologiques prévalentes sur cette période laissent à penser que la détection de cobalt-60 et de manganèse-54 dans le compartiment atmosphérique est due à ces opérations de contrôle.

Compte tenu de l'historique de la tranche 2 de Civaux, une accumulation de produits d'activation dans les tubes des générateurs de vapeur est très probable avec un rapport d'un ordre de grandeur dans les activités volumiques entre le cobalt-60 et de manganèse-54. Ces derniers ont été rejetés lors des opérations de contrôle : l'augmentation de l'activité volumique « avait pour origine l'absence d'efficacité du système de confinement mis en place dans le cadre du chantier, associée à la non-détection par les intervenants des indications de présence de contamination rapportées par les balises de surveillance » (EDF).

Par ailleurs, l'exploitant a réalisé plusieurs contrôles (vérification d'une éventuelle évolution du débit de dose gamma ambiant notamment) et mesures (analyse par spectrométrie gamma réglementaire réalisée sur les regroupements mensuels des filtres quotidiens d'une même station) qui n'ont pas montré de valeur anormale ou atypique dans le cadre de sa surveillance de l'environnement. Aucun dépassement de limites réglementaires de rejet, de seuil d'investigation ou de limite environnementale n'a par ailleurs été observé.

Cet évènement significatif de radioprotection (ESR) a été reclassé au niveau 1 de l'échelle INES en mai 2023, après analyse approfondie de l'évènement et des dysfonctionnements rencontrés, par la direction de la centrale nucléaire de Civaux. L'exposition de la population riveraine qui résulte de cet évènement est négligeable.

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES MESURÉS SUR LE PRÉLÈVEMENT D'AÉROSOLS DE LA STATION OPERA-AIR DE CIVAUX POUR LA PÉRIODE DU 9 AU 16 JANVIER 2023 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)

	Radionucléides d'origine naturelle			Radionucléides d'origine artificielle		
	⁷ Be	²¹⁰ Pb	⁴⁰ K	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn	^{110m} Ag
Prélèvement d'aérosols (9-16 janvier 2023)	1 910 ± 174	96 ± 7	10,5 ± 6	20,8 ± 1,5	1,6 ± 0,3	< 0,33

4.5. SINGULARITÉ RADIOLOGIQUE D'ORIGINE NATURELLE DANS LES SABLES DE LA PLAGE DE TRÉBÉZY ET DE SES ENVIRONS

En avril 2022, un citoyen a détecté la présence d'une singularité radiologique sur des sables de couleur sombre à l'est de la plage de Trébézy, plage située sur la commune de Saint-Nazaire en Loire-Atlantique. Des prélèvements de sables ont alors été réalisés par l'association Vert Pays Blanc et Noir (VPBN) et analysés dans les laboratoires de la Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité (CRIIRAD). Les résultats ont été rendus publics dans un rapport de la CRIIRAD de juin 2022 (note CRIIRAD n° 22-18, complétée en novembre 2022 avec d'autres résultats de mesure⁽¹⁾).

L'IRSN a décidé d'entreprendre une étude spécifique pour caractériser cette singularité radiologique, comprendre son origine et évaluer les expositions potentielles qui en résulteraient pour les usagers des plages.

La première caractérisation par l'IRSN de cette singularité a été réalisée en mai 2023 montre une augmentation très localisée du rayonnement ambiant lorsque l'on se trouve au-dessus de petites étendues de sable de couleur plus foncée que celle du reste de la plage.

Cette augmentation, d'un maximum de 2 $\mu\text{Sv/h}$, correspond à près de 20 fois la valeur du bruit de fond radiologique régional situé autour de 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ (figure 4).

Les analyses complémentaires effectuées sur ces sables plus foncés montrent des teneurs élevées en uranium et en thorium, deux éléments radioactifs d'origine naturelle.

La présence de ces sables est susceptible d'exposer les personnes fréquentant la plage de trois manières :

- l'exposition au rayonnement émis par ces sables ;
- l'inhalation d'une fraction fine de ces sables remise en suspension ;
- l'ingestion involontaire de très petites quantités.

Les évaluations dosimétriques faites par l'IRSN montrent que ces deux dernières voies d'exposition sont faibles, voire négligeables, au regard de l'exposition externe au rayonnement. La somme de ces expositions au rayonnement est évaluée autour de 0,04 mSv/an pour une fréquentation modérée de l'ensemble de la plage et pourrait atteindre de l'ordre de 1 mSv/an pour une personne qui séjournerait plus de 500 heures/an exclusivement sur les petites étendues de sables foncés.

Ces expositions sont du même ordre de grandeur que celles qu'occasionne la radioactivité naturellement présente dans l'environnement français. En conséquence, il n'est pas nécessaire de recommander des mesures de protection de la population qui fréquente la plage de Trébézy à Saint-Nazaire.

Afin de comprendre d'où provient cette augmentation de la radioactivité, l'IRSN a engagé des études complémentaires. Différents types d'analyses permettront de préciser la nature des grains concentrant la radioactivité, leur provenance et quels sont les processus qui les amènent à se concentrer sur ces plages.

Une page du site internet de l'IRSN est consacrée aux études menées par l'Institut dans le cadre de la découverte de cette singularité : <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/environnement/anomalie-radioactive-detecree-dans-sables-plage-trebezy-ses>

(1) La CRIIRAD ne souhaite pas déposer les résultats de ces études dans le RNM.

FIGURE 4 / CARTOGRAPHIE DU DÉBIT D'ÉQUIVALENT DE DOSE MESURÉ À UN MÈTRE DU SOL
SUR LES PLAGES DE TRÉBÉZY ET AUX ALENTOURS



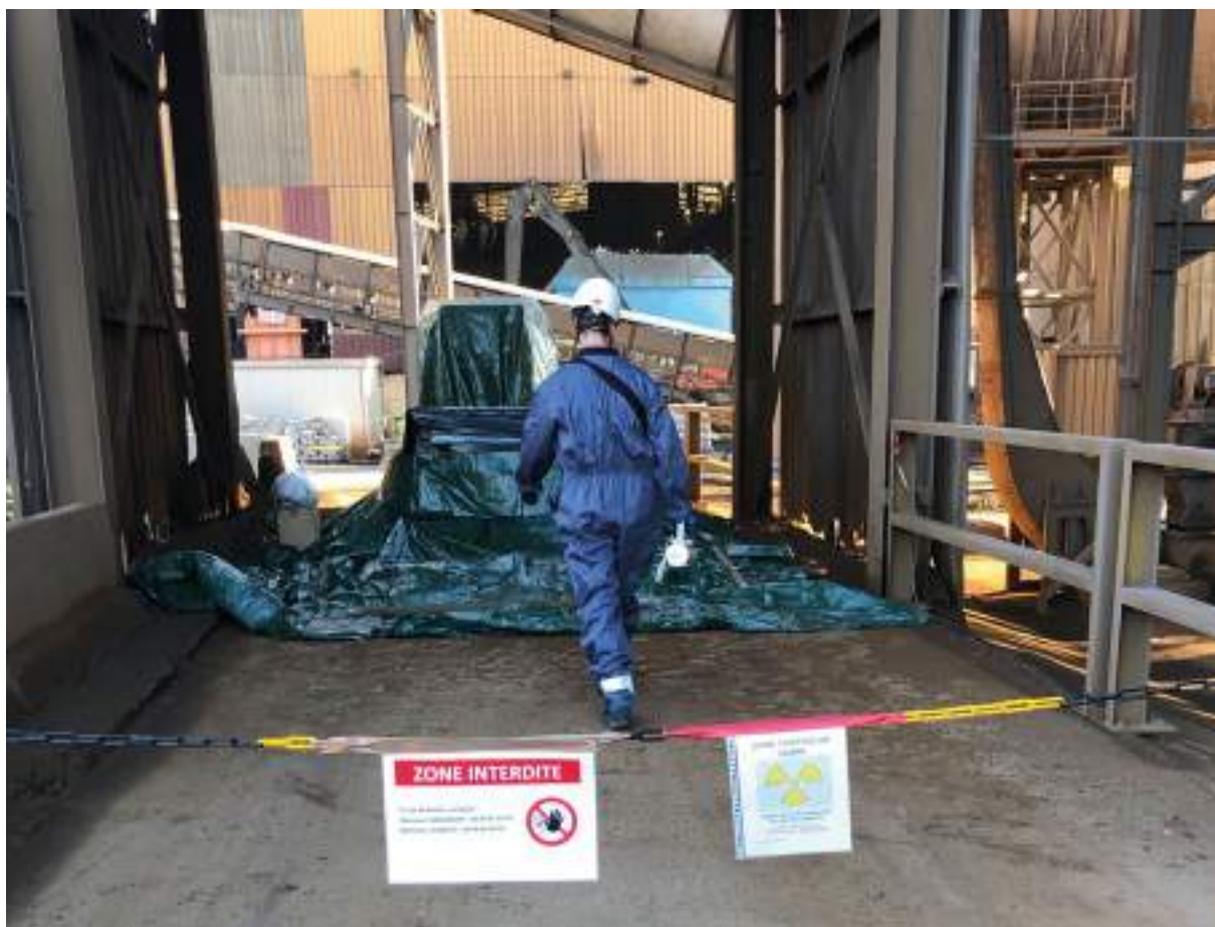
4.6. INCIDENT RADIOLOGIQUE À L'ACIÉRIE LME DE TRITH-SAINT-LÉGER

Le 22 octobre 2021, une valeur inhabituelle de radioactivité a été détectée dans le système de traitement des poussières de l'aciérie de la société LME située à Trith-Saint-Léger (59) puis dans une benne transportant les résidus issus des opérations de fonte, mettant en cause une source radioactive.

En accord avec la préfecture du Nord, l'IRSN a alors dépêché le 23 octobre des experts et des véhicules spécialisés pour effectuer des contrôles de contamination des travailleurs et des mesures de radioactivité sur le site de l'aciérie et dans son environnement.

Les mesures réalisées dans l'environnement à proximité du site dès le 23 octobre n'ont pas mis en évidence d'augmentation du débit de dose ambiant par rapport au niveau habituel. L'IRSN a néanmoins procédé, le 26 octobre 2021, à une cinquantaine de prélèvements dans l'environnement du site de l'aciérie qui ont été analysés dans ses laboratoires en région parisienne. Les résultats des analyses ont permis de conclure à l'absence de marquage de l'environnement à proximité du site, conclusion confortée par l'absence de contamination en haut de la cheminée de l'usine. Par ailleurs, les contrôles effectués les 24 et 25 octobre sur 98 salariés de l'usine présents au moment de l'incident ont confirmé qu'ils n'avaient pas été contaminés.

À l'occasion de cet incident, l'IRSN a publié quatre notes d'information consultables sur son site internet. La dernière est disponible à l'adresse suivante : https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/actualites_presse/actualites/IRSN_NI_Incident-radiologique-usine-LME-Trith-Saint-Leger_29102021.pdf



Aciérie de Trith-Saint-Léger

© IRSN

4.7. ÉPISODE DE SABLES SAHARIENS SUR LA FRANCE DE FÉVRIER 2021 ET DE SEPTEMBRE 2023

Durant la première semaine du mois de février 2021 ainsi que le dimanche 3 septembre 2023, les conditions météorologiques ont conduit à l'arrivée, sur le territoire métropolitain, de masses d'air venant du Sud et contenant des sables sahariens. Comme tous les sols de l'hémisphère nord, ceux du Sahara sont marqués par les retombées issues de l'ensemble des essais nucléaires atmosphériques effectués dans les années 1960. Dans le cadre de sa mission de surveillance de la radioactivité dans l'environnement, les mesures de la radioactivité dans l'air que l'IRSN effectue grâce aux stations de son réseau OPERA (figure 5) permettent de suivre ces épisodes au travers de la mesure de l'activité volumique du césium-137 (^{137}Cs).

Ces deux épisodes sont similaires, avec des masses d'air qui atteignent en premier le sud-ouest de la France et qui s'étendent progressivement sur tout le territoire. Les résultats d'analyses montrent une augmentation significative de l'activité volumique du césium-137 (^{137}Cs) dans l'air par rapport aux niveaux habituellement observés, mais qui reste toutefois extrêmement faible et l'impact dosimétrique associé à ces épisodes, négligeable.

À l'occasion de ces épisodes, l'IRSN a publié deux pages dédiées sur son site internet :

- épisode de février 2021 : <https://www.irsn.fr/actualites/episode-sables-sahariens-sur-france-fevrier-2021>
- épisode de septembre 2023 : <https://www.irsn.fr/actualites/episode-sables-sahariens-sur-france-septembre-2023>

L'IRSN met également à disposition les résultats de ses mesures effectuées durant ces épisodes sur le site internet du Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (réseau RNM) : <https://www.mesure-radioactivite.fr/#/>

FIGURE 5 / CHANGEMENT DU FILTRE SUR UNE STATION OPÉRA



© Laurent Zylberman / Graphix-images / Médiathèque IRSN

Prélèvement d'eau de cours d'eau.





05

ANNEXES

5.1. MODALITÉS DE PRÉSENTATION ET D'EXPLOITATION DES RÉSULTATS DE MESURE DANS LE <i>BILAN RADIOLOGIQUE 2021-2023</i>	314
Origine des données et unités	314
Seuils de décision, résultats non significatifs, incertitudes métrologiques et arrondis.....	315
Moyennes et autres indicateurs statistiques	316
5.2. CALCUL DE MOYENNE ET PRISE EN COMPTE DES VALEURS NON SIGNIFICATIVES	316
Cas n° 1 : peu de mesures inférieures au seuil de décision et données homogènes	317
Cas n° 2 : peu de mesures non significatives mais jeu de données hétérogène	317
Cas n° 3 : pourcentage de mesures non significatives élevé.....	317
5.3. LA REPRÉSENTATION D'INDICATEURS SOUS FORME DE « BOÎTE À MOUSTACHES »	318
5.4. MÉTHODE UTILISÉE POUR ESTIMER LES DOSES	319
Données utilisées pour les calculs de doses.....	319
Prise en compte du bruit de fond radiologique	320
Radionucléides et filiations	320
La grandeur calculée	320
Les voies d'exposition.....	320
Présentation des scénarios d'exposition et calculs.....	321
Liste des références	326
5.5. GLOSSAIRE	327
5.6. COMITÉ ÉDITORIAL	335

05 ANNEXES

5.1. MODALITÉS DE PRÉSENTATION ET D'EXPLOITATION DES RÉSULTATS DE MESURE DANS LE BILAN RADIOLOGIQUE 2021-2023

Origine des données et unités

Les données présentées dans ce bilan sous forme de graphiques ou de tableaux synthétiques sont issues des résultats de la surveillance, présents dans la base de données du RNM au 31 décembre 2023 et couvrant la période de janvier 2021 à décembre 2023. Toutefois, le recours à des données antérieures permet de mieux apprécier les évolutions temporelles au travers de chroniques. Les données exploitées proviennent également de résultats acquis par l'IRSN dans le cadre d'études spécifiques telles que les constats radiologiques ou des suivis radio-écologiques réalisés pour le compte d'exploitants nucléaires (EDF ou Orano). Enfin, dans le chapitre relatif aux anciens sites miniers, sont présentés et commentés des résultats de mesure de l'énergie alpha potentielle (EAP) acquis par Orano sur et autour de ses sites. En accord avec l'ASN et la MSNR et bien que n'étant pas pour le moment agréées, ces données ont été jugées suffisamment pertinentes et fiables, pour figurer dans ce rapport.

Le tableau 1 présente les différents types de résultats de mesure présentés et exploités dans ce bilan ainsi que leurs unités.

Dans le cas du carbone-14, lorsque les activités ajoutées localement autour d'une installation sont trop faibles pour être distinguées du bruit de fond radiologique par des mesures d'activité massique exprimées en Bq/kg frais, des mesures de l'activité spécifique exprimées en Bq/kg de carbone permettent de quantifier des activités ajoutées de l'ordre de quelques pourcents de ce bruit de fond (chapitre 1). À partir de ces activités spécifiques ajoutées, il est possible de déduire les activités massiques correspondantes au moyen de la teneur en carbone des denrées concernées. La méthode utilisée pour cette conversion est présentée dans le chapitre 5.4.

Trois types de résultats d'analyse du tritium dans les matrices biologiques (denrées ou indicateurs biologiques) sont exploités dans ce bilan radiologique : des mesures de tritium total, exprimées en Bq/kg frais, des mesures de tritium organiquement lié (TOL) exprimées en Bq/kg frais de TOL ou en Bq/L d'eau de combustion, et des activités de tritium libre (HTO) exprimées en Bq/kg frais de tritium libre ou en Bq/L d'eau de séchage. Les relations entre ces différentes grandeurs et unités sont fournies dans le chapitre 5.4.

TABLEAU 1 / LES DIFFÉRENTS TYPES DE RÉSULTATS DE MESURE PRÉSENTÉS ET EXPLOITÉS AVEC LEURS UNITÉS

Grandeur mesurée	Unités associées
Débits de dose	Sv/h (sous-multiples μ Sv/h et nSv/h)
Activité des rejets	Bq (multiples MBq, GBq et TBq)
Activité volumique de l'air	Bq/m ³ (sous-multiples mBq/m ³ et μ Bq/m ³)
Énergie Alpha Potentielle	J/m ³ (sous-multiple nJ/m ³)
Activité volumique des eaux (pluie, cours d'eau, marines...)	Bq/L (sous-multiple mBq/L)
Activité massique des sols	Bq/kg sec (sous-multiple mBq/kg sec)
Activité massique des indicateurs biologiques	Bq/kg sec (sous-multiple mBq/kg sec)
Activité massique des denrées	Bq/kg frais (sous-multiple mBq/kg frais) Bq/kg de carbone pour le carbone-14 Bq/L d'eau de combustion pour le tritium organiquement lié (TOL) Bq/L d'eau de séchage pour le tritium libre (HTO)

Seuils de décision, résultats non significatifs, incertitudes métrologiques et arrondis

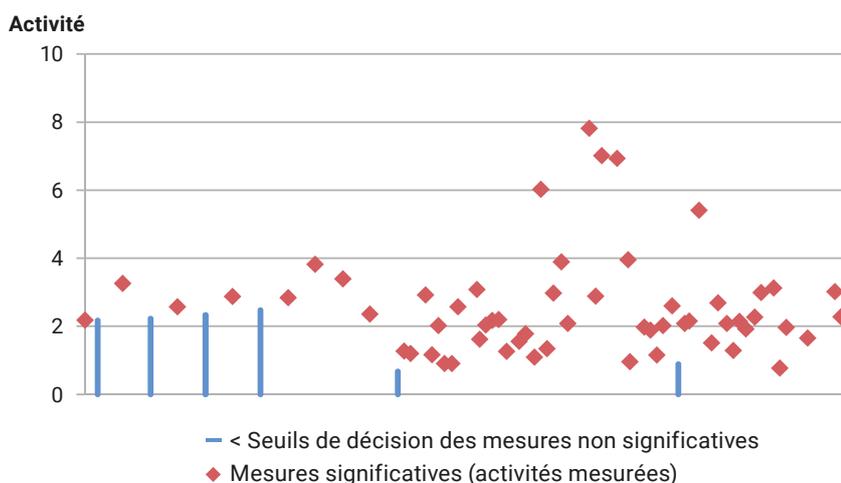
Même en l'absence de radioactivité dans l'échantillon à mesurer, les dispositifs de mesures radiologiques fournissent un résultat de mesure qui est lié aux rayonnements extérieurs, notamment aux rayonnements naturels (chapitre 1), auxquels est exposé le détecteur, ainsi qu'à un bruitage intrinsèque au 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 métrologue « 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 métrologue déclare alors l'activité de l'échantillon « inférieure au seuil de décision » : $< SD$. Le seuil de décision est donc la valeur minimale que doit avoir la mesure d'un échantillon pour que le métrologue 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.

Les activités de certains radionucléides dans l'environnement étant très faibles, il est fréquent que les séries de résultats de mesure comportent des résultats inférieurs au seuil de décision. Ces résultats sont également qualifiés de résultats « non significatifs ». Un résultat « significatif » ou « mesure significative » désigne alors une activité supérieure ou égale au seuil de décision. Les modalités de prise en compte des résultats non significatifs pour les calculs de moyennes sont indiquées dans le chapitre 5.2.

Dans les représentations graphiques, les résultats non significatifs sont représentés par des « bâtons verticaux » allant de l'axe des abscisses jusqu'à la valeur du SD. Dans la légende, il est mentionné « $< SD$ ». Les résultats significatifs sont représentés par des symboles de couleur suivant la légende fournie (figure 1).

Le sigle « nm » dans les tableaux indique un paramètre ou un radionucléide non mesuré.

FIGURE 1 / EXEMPLE DE REPRÉSENTATION UTILISÉE POUR DISTINGUER LES MESURES INFÉRIEURES ET SUPÉRIEURES AUX SEUILS DE DÉCISION



En raison notamment de la fluctuation du bruit de fond métrologique, il n'existe pas de mesure exacte d'une activité. Le résultat d'analyse 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 du présent rapport.

L'arrondissement utilisé pour l'expression des résultats sous forme de moyenne est établi de manière à pouvoir disposer de deux chiffres significatifs. 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. À titre d'exemple, si l'on dispose du résultat suivant, 23,12548 Bq/L, la valeur indiquée sera 23,1 Bq/L.

Moyennes et autres indicateurs statistiques

L'indicateur statistique choisi pour le présent bilan est une moyenne arithmétique, calculée à partir d'une part, des résultats d'analyse significatifs ($> SD$) et d'autre part, des résultats d'analyse non significatifs ($< SD$) auxquels est affectée la valeur du SD lorsque certaines conditions sont remplies. Les raisons du choix de cet indicateur, la méthode utilisée et les différents cas possibles sont présentés dans le chapitre 5.2.

Dans le chapitre 1, des « boîtes à moustaches » sont utilisées pour représenter les gammes d'activités observées dans l'environnement pour les différents radionucléides qui constituent le bruit de fond radiologique. Les informations fournies dans ces représentations et leur signification sont précisées dans le chapitre 5.3.

5.2. CALCUL DE MOYENNE ET PRISE EN COMPTE DES VALEURS NON SIGNIFICATIVES

Les activités de certains radionucléides dans l'environnement étant très faibles, il est fréquent que les séries de résultats de mesure comportent des résultats inférieurs au seuil de décision (SD, chapitre 5.1). L'indicateur statistique le plus connu et utilisé, la moyenne arithmétique (somme des valeurs d'une série divisée par le nombre de valeurs), ne permet pas, à elle seule, de prendre en compte ces résultats. Toutefois, ils ne doivent pas être écartés et lorsque leur proportion n'est pas trop importante, il est pertinent de les considérer dans les calculs statistiques.

Ainsi, pour le présent *Bilan radiologique*, l'indicateur choisi est une moyenne arithmétique calculée à partir d'une part des mesures significatives (i. e. dont la valeur est $> SD$) et d'autre part des mesures non significatives (i. e. dont la valeur est $< SD$) auxquelles sont affectées la valeur du SD lorsque certaines conditions sont remplies. Les différents cas de figure possibles et la méthode utilisée pour chacun d'eux sont explicités ci-après.

Cette méthode a été choisie en prenant en compte des méthodes statistiques reconnues. Ce choix reflète une volonté de ne jamais sous-estimer la valeur de la moyenne calculée sans toutefois être trop pénalisant, ni émettre d'hypothèses non vérifiables sur les lois de distribution des mesures. Deux paramètres déterminent le mode de calcul de la moyenne :

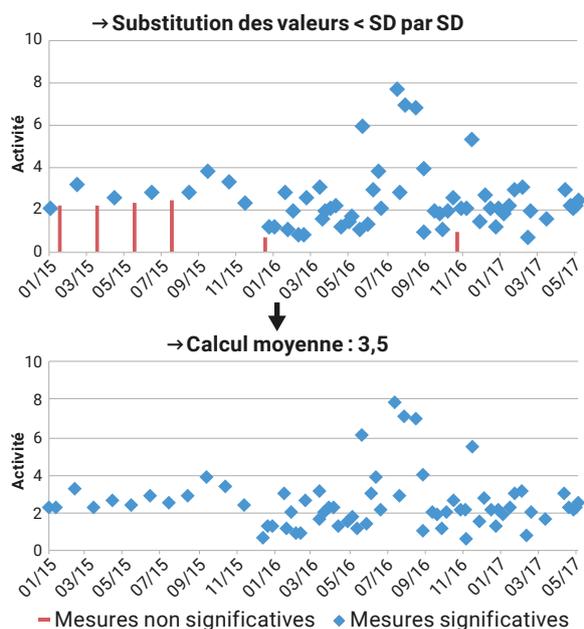
- le nombre de mesures inférieures au seuil de décision (SD) par rapport au nombre de mesures totales ; la littérature est unanime sur le fait qu'au-delà d'un certain pourcentage de mesures non significatives (environ 80 %) il n'existe pas de méthode fiable pour estimer la moyenne de l'échantillon : l'erreur commise serait alors trop importante. Dans le cas du présent rapport, nous avons considéré que la méthode retenue n'est plus satisfaisante au-delà de 50 % de résultats de mesure non significatifs (inférieurs au seuil de décision) ;
- la présence, pour le même jeu de données, de mesures hétérogènes (mesures obtenues avec des appareillages de précision très différente) et mélangeant des seuils de décision sensiblement différents (voir ci-après l'exemple du cas n° 2).

Au final, trois cas de figure différents ont été identifiés, le type de calcul est spécifique pour chacun d'entre eux.

Cas n° 1 : peu de mesures inférieures au seuil de décision et données homogènes

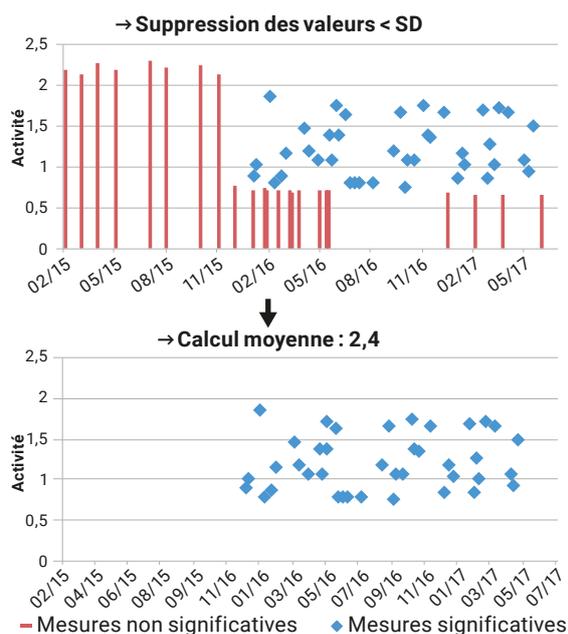
Dans ce cas n° 1, le pourcentage de mesures non significatives est inférieur à 50 % [3], et le jeu de données est homogène.

Les mesures non significatives (exprimées en < SD) sont substituées par la valeur de SD et le calcul des indicateurs se fait à partir de ce nouveau jeu de données. Ce cas peut être illustré par l'exemple ci-contre.



Cas n° 2 : peu de mesures non significatives mais jeu de données hétérogène

Le cas n° 2 est caractérisé par un pourcentage de mesures non significatives inférieur à 50 %, mais aussi par la présence de résultats hétérogènes. Dans ce cas-là, les mesures inférieures au seuil de décision sont supprimées et le calcul de la moyenne se fait à partir de ce nouveau jeu de données (de nombre réduit). Ce cas peut être illustré par le graphique ci-contre.

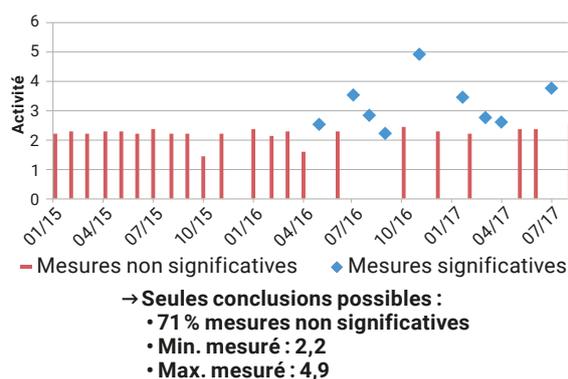


Cas n° 3 : pourcentage de mesures non significatives élevé

Le pourcentage de mesures non significatives est supérieur à 50 %.

Dans ce cas, le calcul de la moyenne n'est plus effectué. Les informations qui seront données au sujet de ce jeu de mesures seront :

- la gamme des valeurs réellement mesurées (min, max) ;
- le pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision.



5.3. LA REPRÉSENTATION D'INDICATEURS SOUS FORME DE « BOÎTE À MOUSTACHES »

Pour décrire une série de résultats de mesure, et notamment sa dispersion, il est possible de fournir les bornes minimum et maximum, déterminant ainsi la gamme complète des valeurs. Toutefois, il arrive que les minimums et maximums correspondent à des valeurs extrêmes qui donnent une vision trop large de la gamme de valeurs les plus fréquemment rencontrées. Pour déterminer cette gamme, il est possible de calculer des percentiles. Ainsi, 80 % des données sont compris entre le percentile 10 % et le percentile 90 % ; ou encore 90 % des résultats sont inférieurs à ce percentile 90.

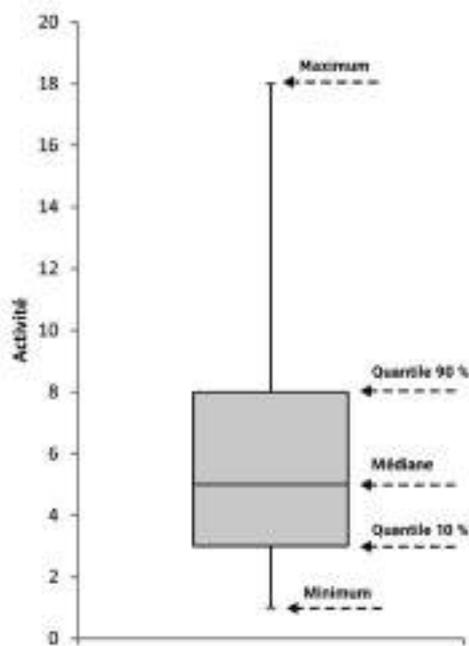
La « boîte à moustaches » permet de représenter simultanément plusieurs indicateurs et d'obtenir une vision synthétique et complète de la répartition des résultats de mesures. Habituellement, la « boîte à moustaches » fournit des percentiles et notamment

une médiane (percentile 50) pour indiquer le centre de la distribution (50 % des valeurs sont inférieures à la médiane). Ce choix de représentation a été utilisé notamment dans le chapitre 1 relatif aux valeurs de référence du bruit de fond radiologique environnemental (dans le cas particulier du chapitre 2, les valeurs inférieures au seuil de décision ne sont pas prises en compte).

Références

- [1] Helsel D, *Nondetects and Data Analysis: Statistics for Censored Environmental Data*, Wiley.
- [2] Antweiler RC and Taylor HE, *Evaluation of statistical treatments of left-censored environmental data using coincident uncensored data sets: Summary statistics*, Environmental science & technology, 2008.
- [3] Rapport interne IRSN 2018 « Méthodes statistiques pour le traitement de données censurées – Choix d'indicateur(s) applicables à la surveillance de l'environnement ».

FIGURE 2 / EXEMPLE DE GRAPHIQUE EN « BOÎTE À MOUSTACHES »



5.4. MÉTHODE UTILISÉE POUR ESTIMER LES DOSES

Données utilisées pour les calculs de doses

Les résultats de mesures, sur lesquels se fondent les calculs de doses, sont des activités volumiques dans l'air, l'eau et le lait, et massiques dans les denrées solides (productions végétales [légume feuille, fruit, etc.], productions animales [viande, œuf, etc.] et produits de la mer ou de rivières (poisson, crustacé, mollusque, etc.). Dans le cadre du bilan radiologique, les activités sont moyennées par radionucléide, par matrice (par exemple mesure de l'activité volumique de l'air) et sur l'ensemble de la période indiquée. Pour les denrées, ces activités sont exprimées en Bq/kg de denrée fraîche.

Dans le cas du carbone-14, lorsque les activités ajoutées localement autour d'une installation sont trop faibles pour être distinguées du bruit de fond radiologique par des mesures d'activité massique exprimées en Bq/kg frais, des mesures de l'activité spécifique exprimées en Bq/kg de carbone, permettent

de quantifier des activités ajoutées de l'ordre de quelques pourcents de ce bruit de fond. À partir de ces activités spécifiques ajoutées, il est possible de déduire des activités massiques au moyen de la teneur en carbone élémentaire des denrées mesurée ou théorique :

$$A_{mC14,denrée(i)} = A_{spec.C14,denrées(i)} \cdot C_{totdenrée(i)} \quad [1]$$

Dans le cas du tritium, trois types de mesure dans les denrées sont exploités dans ce bilan radiologique : des mesures de tritium total, exprimées en Bq/kg frais, des mesures de tritium lié (TOL) exprimées en Bq/kg frais de TOL ou en Bq/L d'eau de combustion, et des activités de tritium libre (HTO) exprimées en Bq/kg frais de tritium libre ou en Bq/L d'eau de déshydratation. Les coefficients de dose étant différents pour le TOL et le HTO, il est nécessaire dans tous les cas de disposer séparément des activités massiques des fractions liées (TOL) et libres (HTO) pour chaque denrée. Les relations entre ces différentes activités sont les suivantes :

$$A_{mH3total,denrée(i)} = A_{mTOL,denrées(i)} + A_{mHTO,denrées(i)} \quad [2]$$

avec :

$$A_{mTOL,denrées(i)} = A_{v,eaucomb(i)} \cdot EQE_{(i)}$$

$$A_{mHTO,denrées(i)} = A_{v,eauséchage(i)} \cdot TE_{(i)}$$

TABLEAU 2 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DES ACTIVITÉS DE CARBONE-14 DANS LES DENRÉES

Grandeur	Unité	Valeur retenue	Référence ou explication
$A_{m,denrée(i)}$ Activité massique de la denrée i	Bq/kg frais	/	
$A_{spec,denrée(i)}$ Activité spécifique de la denrée i	Bq/kg de carbone	Mesure dans l'environnement	/
$C_{totdenrée(i)}$ Teneur en carbone élémentaire totale de la denrée i	kg de C/kg frais ou sec		AIEA [10] ou données IRSN

TABLEAU 3 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DES ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS LES DENRÉES

Grandeur	Unité	Valeur retenue	Référence ou explication
$A_{mH3total,denrée(i)}$ Activité massique en tritium total de la denrée i	Bq/kg frais	/	/
$A_{mTOL,denrée(i)}$ Activité massique en tritium lié de la denrée i	Bq/kg frais de TOL	/	/
$A_{mHTO,denrée(i)}$ Activité massique en tritium libre de la denrée i	Bq/kg frais de HTO	/	/
$A_{v,eaucomb(i)}$ Activité volumique de l'eau de combustion de la denrée i	Bq/L	Mesure	/
$A_{v,eauséchage(i)}$ Activité volumique de l'eau de séchage de la denrée i	Bq/L	Mesure	/
$EQE_{denrée(i)}$ Teneur en équivalent eau de la matière sèche de la denrée i	L/kg frais	0,6	IAEA [10] et données IRSN
$TE_{denrée(i)}$ Teneur en eau de la denrée i	L/kg frais	Mesure ou référence	IAEA ou données IRSN

Prise en compte du bruit de fond radiologique

Des doses ajoutées attribuables aux rejets des installations sont estimées dans le bilan radiologique. Lorsqu'un radionucléide est présent dans l'environnement hors de toute influence d'une installation (radionucléides naturels ou rémanents des retombées anciennes, cf. chapitre 1), ce bruit de fond environnemental est soustrait des mesures avant d'estimer ces doses ajoutées. Enfin, en l'absence de valeur de bruit de fond, les activités « brutes » mesurées sont directement utilisées pour estimer les doses qui sont alors surestimées.

Par ailleurs, les activités du bruit de fond radiologique du carbone-14 qui sont soustraites aux activités massiques mesurées autour d'un site avant d'estimer les doses attribuables aux rejets, sont calculées selon l'équation [1] avec une valeur de l'activité spécifique du bruit de fond égale à 222 Bq/kg de carbone (chapitre 1).

Enfin, les activités du bruit de fond radiologique du tritium qui sont soustraites aux activités massiques mesurées autour d'un site avant d'estimer les doses, sont calculées suivant l'équation [2] précédente avec une valeur de l'activité du bruit de fond égale à 0,8 Bq/L d'eau de combustion ou de déshydratation (chapitre 1).

Radionucléides et filiations

Pour chaque radionucléide quantifié, il faut également considérer les descendants si ces derniers ont été quantifiés (cas notamment des familles naturelles de l'uranium).

Les radionucléides susceptibles de dépasser le bruit de fond radiologique et de donner lieu à des calculs des doses sont listés ci-dessous :

- radionucléides mesurés dans l'air : ^3H , ^{14}C , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{124}Sb , ^{129}I , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{230}Th , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$;
- radionucléides mesurés dans les denrées ou l'eau : ^3H , ^{14}C , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{90}Sr , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{129}I , ^{137}Cs , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$.

La question de la filiation se pose pour un nombre limité de radionucléides, à considérer au cas par cas :

- pour le ^{90}Sr , il est retenu de fait l'équilibre avec son descendant qui est l' ^{90}Y ;
- pour l'uranium (234, 235 et 238), en fonction de ses caractéristiques isotopiques suivant le type d'industrie de chaque site (cas des sites de fabrication du combustible : Malvési, Romans-sur-Isère et Tricastin).

Dans le cas où l'état d'équilibre avec les descendants n'est pas connu, seul le radionucléide quantifié sera pris en compte dans le calcul de la dose.

La grandeur calculée

Pour réaliser les calculs d'impact dosimétrique pour la population sur la base de mesures effectuées dans l'environnement, il a été retenu de calculer des doses efficaces. Chaque dose est exprimée en Sv/an puis convertie en sous-multiple, principalement le $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Les doses sont calculées pour les adultes.

Les voies d'exposition

Les principales voies d'exposition à la radioactivité ajoutée lorsqu'une personne réside à proximité d'un site nucléaire sont :

- l'exposition interne par inhalation d'aérosols ou de gaz radioactifs ;
- l'exposition interne par voie transcutanée pour le tritium dans l'air (sous forme HTO) ;
- l'exposition externe par immersion dans un panache constitué de gaz rares (cas du ^{85}Kr à La Hague) ;
- et enfin l'exposition interne par ingestion de denrées et/ou d'eau pour la personne qui consomme des produits d'origine locale.

Présentation des scénarios d'exposition et calculs

Calcul de la dose interne reçue par inhalation d'aérosols ou de gaz radioactifs

Il est considéré de manière pénalisante une personne qui respire l'air extérieur sans aucune protection de l'habitat. Elle est exposée 100 % du temps soit 8 760 h par an.

La dose annuelle reçue par inhalation du radionucléide i est calculée à partir de la formule [3] suivante :

$$E_{inh}(i) = A_v(i) \cdot d_r \cdot t \cdot e_{inh}(i) \cdot 10^6 \quad [3]$$

Calcul de la dose interne reçue par voie transcutanée (cas du ^3H sous forme HTO)

Il a été retenu l'hypothèse pénalisante selon laquelle la dose annuelle reçue par voie transcutanée due au tritium présent dans l'air sous forme HTO est égale à la dose annuelle reçue par inhalation de tritium sous forme HTO.

$$E_{transcutanée_3\text{H}(\text{HTO})}(i) = E_{inh_3\text{H}(\text{HTO})} \quad [4]$$

TABLEAU 4 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DE LA DOSE INTERNE REÇUE PAR INHALATION

Grandeur	Unité	Valeur retenue	Référence ou explication
$E_{inh}(i)$ Dose annuelle reçue par inhalation du radionucléide i	$\mu\text{Sv}/\text{an}$	/	/
$A_v(i)$ Activité volumique moyenne mesurée dans l'air	Bq/m^3	Mesure dans l'environnement	/
t Durée d'exposition par an	h/an	8 760	Exposition 100 % du temps sans facteur de protection pour l'habitat
d_r Débit respiratoire	m^3/h	0,96	Débit respiratoire pour une activité moyenne d'un adulte (issue de la publication 66 de la CIPR)
$e_{inh}(i)$ Dose efficace engagée par unité d'incorporation par inhalation du radionucléide i	Sv/Bq	Fonction du radionucléide	Valeurs issues du tableau 1.2 de l'arrêté du 1 ^{er} septembre 2003 [2]*

* Puisqu'aucune information n'est disponible sur la forme des aérosols mesurés dans l'environnement, le type d'absorption pulmonaire (rapide (F), moyenne (M), lente (S), gaz et vapeur (V)) utilisé dans les calculs a été choisi conformément à ce qui est préconisé dans le tableau 1.3 de l'arrêté [2]. Dans le cas où l'arrêté ne prévoit aucune forme particulière, la forme conduisant à la dose efficace engagée la plus pénalisante est retenue.

TABLEAU 5 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DE LA DOSE INTERNE REÇUE PAR VOIE TRANSCUTANÉE POUR LE TRITIUM SOUS FORME HTO

Grandeur	Unité
$E_{transcutanée_3\text{H}(\text{HTO})}$ Dose annuelle reçue par voie transcutanée	$\mu\text{Sv}/\text{an}$
$E_{inh}(i)$ Dose annuelle reçue par inhalation du tritium HTO	$\mu\text{Sv}/\text{an}$



Calcul de la dose externe reçue par immersion dans une ambiance où il y a un gaz rare (cas du ⁸⁵Kr à La Hague)

Il est considéré de manière pénalisante une personne exposée 100 % du temps sans aucune protection de l'habitat à un gaz rare. Dans ce cas, seule l'exposition externe par immersion est à considérer. La dose annuelle reçue par exposition externe par immersion dans la substance i est :

$$E_{\text{ext}_{\text{immersion}}}(i) = A_v(i) \cdot t \cdot e_{\text{immersion}}(i) \cdot 10^6 \quad [5]$$

TABLEAU 6 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DE LA DOSE EXTERNE REÇUE PAR IMMERSION DANS UN GAZ RARE

Grandeur	Unité	Valeur retenue	Référence ou explication
$E_{\text{ext}_{\text{immersion}}}(i)$ Dose annuelle reçue par immersion dans le radionucléide i	μSv/an	/	/
$A_v(i)$ Activité volumique moyenne mesurée dans l'air	Bq/m ³	Mesure dans l'environnement	/
t Durée d'exposition par an	j/an	365	Exposition 100 % du temps sans facteur de protection pour l'habitat
$e_{\text{immersion}}(i)$ Coefficient de dose efficace du radionucléidee i	(Sv/j) / (Bq/m ³)	Fonction du radionucléide	Valeurs issues du tableau 2.2 de l'arrêté du 1 ^{er} septembre 2003 [2]

Calcul de la dose interne reçue par ingestion de denrées

Pour ce scénario d'exposition, seul l'adulte sera étudié.

Les régimes alimentaires peuvent varier en fonction de la zone géographique. Au vu des évaluations dosimétriques réalisées dans le précédent bilan radiologique, 3 régimes alimentaires ont été retenus. Le 1^{er} est issu de l'enquête alimentaire faite par le CREDOC [8] dans le Nord Cotentin et sera utilisé pour le site de La Hague. Le 2^e est issu de l'enquête alimentaire faite pour le site de Marcoule [7] et sera utilisé pour le site de Marcoule. Pour les autres sites, il a été décidé de retenir un régime moyen pour la France entière à partir des données issues de l'enquête alimentaire INCA 3 [3]. À titre d'analyse de sensibilité, d'autres régimes alimentaires peuvent être pris en compte pour évaluer des doses dues à des pratiques particulières (gros mangeur de poissons...).

Pour le calcul, la part de denrée qui est produite localement est également prise en compte, avec la notion de taux d'autoconsommation. Ce taux varie en fonction de la denrée considérée et de l'enquête réalisée. Pour les deux premières études (CREDOC [8] et Marcoule [7]), la valeur du taux d'autoconsommation est disponible. À l'inverse, pour l'enquête INCA 3 [3] aucune donnée n'a été fournie. Les valeurs disponibles dans l'étude INSEE [5] pour la population agricole vivant en commune rurale ont été appliquées.

La dose efficace annuelle reçue par ingestion de denrées pour le radionucléide *i* est calculée à partir de la formule suivante (les grandeurs et valeurs correspondantes sont indiquées dans les tableaux 7 et 8) :

$$E_{\text{ing_denrées}}(i) = e_{\text{ing}}(i) \sum_{\text{denrées}_j} (A_{m, \text{denrée}_j}(i) \cdot q_{\text{denrée}_j} \cdot T_{a, \text{denrée}_j}) \cdot 10^6 \quad [6]$$

De plus, afin d'estimer le plus complètement possible les doses dues au tritium, les activités en tritium des denrées autour d'un site peuvent également être déduites de celles du HTO mesurées dans l'air, à partir des formulations précédentes. Ce calcul, basé sur l'assertion d'un équilibre du tritium dans toutes les composantes du milieu terrestre peut conduire pour différentes raisons à une surestimation potentielle des doses à la population. Notamment, l'activité en tritium d'une denrée d'origine animale (lait, viande ou œuf) est liée à l'activité moyenne des aliments consommés par l'animal. Or ceux-ci peuvent n'être que partiellement d'origine locale.

TABLEAU 7 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DE LA DOSE INTERNE REÇUE PAR INGESTION DE DENRÉES

Grandeur	Unité	Valeur retenue	Référence ou explication
$E_{\text{ing_denrées}}(i)$ Dose annuelle reçue par ingestion de denrées pour le radionucléide <i>i</i>	µSv/an	/	/
$A_{m, \text{denrée}_j}(i)$ Activité massique du radionucléide <i>i</i> dans la denrée <i>j</i>	Bq/kg frais	Mesure dans l'environnement	/
$q_{\text{denrée}_j}$ Quantité d'aliment ingérée par an	kg frais/an	Dépend de la denrée et de l'enquête alimentaire retenue	Régime alimentaire rattaché au site étudié (La Hague ou Marcoule) ou régime alimentaire de la France entière pour les autres sites
$e_{\text{ing}}(i)$ Dose efficace engagée par unité d'incorporation par ingestion du radionucléide <i>i</i>	Sv/Bq	Fonction du radionucléide	Valeurs issues du tableau 1.1 de l'arrêté du 1 ^{er} septembre 2003
$T_{a, \text{denrée}_j}$ Taux d'autoconsommation de la denrée considérée	-	Dépend de la denrée et de l'enquête alimentaire retenue	Il s'agit du pourcentage de denrées produites localement. Cette valeur dépend de l'étude considérée. Pour l'étude INCA 3 ce sont les données de l'étude INSEE 1991

TABLEAU 8 / QUANTITÉS CONSOMMÉES ANNUELLEMENT DE CHAQUE TYPE DE DENRÉES ET TAUX D'AUTOCONSOMMATION (fraction de denrées d'origine locale) UTILISÉS POUR ESTIMER LES DOSES PAR INGESTION

	Site de La Hague		Site de Marcoule		Autre site	
	Régime alimentaire ⁽¹⁾ (kg frais/an ou L/an)	Taux d'auto- consommation	Régime alimentaire ⁽²⁾ (kg frais/an ou L/an)	Taux d'auto- consommation ⁽³⁾	Régime alimentaire ⁽⁴⁾ (kg frais/an ou L/an)	Taux d'auto- consommation ⁽⁵⁾
Lait (vache)	54,2	0,148	60,51	0	21,99	0,43
Lait (chèvre)	-	-	0	0	5,50	0
Lait (brebis)	-	-	0	0	0	0,43
Yaourt et fromages blancs	37,8	0,182	33,85	0	38,13	0,058
Fromages de vache	9,4	0,242	11,92	0	12,92	0,016
Fromages de chèvre	-	-	3,62	0,12	1,13	0,05
Matières grasses animales (beurre)	2,5	0,440	3,30	0	3,29	0,05
Œuf	6,2	0,633	12,65	0,52	4,60	0,63
Légumes racines	39,3	0,540	40,56	0,75	37,96	0,75
Légumes feuilles	3,4	0,574	28,00	0,75	24,01	0,71
Légumes à fruits	-	-	120,03	0,89	60,28	0,35
Miel	2,4	0,100	0,53	0,64	2,37	0,11
Fruits	25,6	0,112	93,40	0,76	52,37	0,21
Confitures	4,8	0,100	4,60	0,42	4,75	0,52
Poissons marins	16,8	0,354	14,66	0	10,88	0,16
Poissons eaux douces	-	-	1,37	0,63	0,59	0,16
Crustacés	3,3	0,54	2,02	0	0,76	0
Coquillages/mollusques	3,6	0,75	2,02	0	0,93	0
Viande (bœuf)	-	-	16,90	0,006	12,99	0,38
Viande (volaille)	8,8	0,37	14,37	0,16	16,30	0,74
Viande (mouton)	1,5	0,40	5,56	0,028	7,79	0,49
Viande (lapin)	2,5	0,37	1,50	0,19	2,20	0,93
Viande (porc)	-	-	26,16	0,008	29,5	0,24
Gibier	-	-	9,87	0,954	0,4	0,89
Blé (céréales)	-	-	18,8	0	30,96	0,015
Vin	-	-	51,87	0,94	26,71	0,23
Champignon sauvage	-	-	3,10	0,69	2,5	0,97

(1) Régime alimentaire d'une personne résidant dans le Nord Cotentin et dont le chef de famille est pêcheur.

(2) Régime alimentaire moyen autour du site de Marcoule (entre 5 et 10 km).

(3) Taux d'autoconsommation moyen.

(4) Régime alimentaire moyen en France métropolitaine.

(5) Taux d'autoconsommation représentatif d'une population agricole vivant en commune rurale.

Calcul de la dose interne reçue par ingestion d'eau de boisson

Afin d'évaluer l'impact de la présence de radionucléides dans certains cours d'eau ou eaux souterraines, il est retenu l'hypothèse pénalisante selon laquelle l'eau est utilisée comme eau de consommation. Par conséquent, certaines hypothèses émises pour calculer la dose indicative (DI) (anciennement dose totale indicative (DTI)) présentée dans l'Arrêté du 12 mai 2004 [6], sont utilisées. On considère donc une consommation régulière par des adultes de 2 L d'eau par jour, soit 730 L d'eau par an. Les activités volumiques retenues sont les valeurs mesurées dans les eaux filtrées.

La dose annuelle reçue par ingestion d'eau pour la substance *i* se calcule comme suit (les grandeurs correspondantes sont indiquées dans le tableau 9) :

$$E_{\text{ing-eau}}(i) = A_v(i) \cdot q_{\text{ing-eau}} \cdot e_{\text{ing}}(i) \cdot 10^6 \quad [7]$$

Dans le cas où les eaux analysées ne sont pas destinées à la consommation (ex. : eaux provenant d'un canal ou d'un ruisseau) et que l'on souhaite évaluer leur impact sur la santé, il est proposé de calculer une dose unitaire par ingestion d'un litre d'eau. En fonction des données disponibles, le calcul se fera à partir des résultats de mesure sur des eaux non filtrées ou filtrées. Dans ce cas, il convient de privilégier le calcul sur des eaux non filtrées pour être représentatif de l'eau qui serait bue en plongeant une gourde directement dans le cours d'eau. Toutefois, la plupart du temps, les analyses sur des échantillons d'eau sont faites sur des eaux filtrées.

Dans tous les cas, le calcul est identique à la formule [5], seule la quantité d'eau consommée est ramenée à 1 L et l'unité est exprimée en $\mu\text{Sv/L}$.

TABLEAU 9 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DE LA DOSE INTERNE REÇUE PAR INGESTION D'EAU

Grandeur	Unité	Valeur retenue	Référence ou explication
$E_{\text{ing-eau}}(i)$ Dose annuelle reçue par ingestion d'eau pour la substance <i>i</i>	$\mu\text{Sv/an}$	/	/
$A_v(i)$ Activité volumique mesurée dans l'eau filtrée pour le radionucléide <i>i</i>	Bq/L	Mesure dans l'environnement	/
$q_{\text{ing-eau}}$ Quantité d'eau consommée par an	L/an	730	Arrêté du 12 mai 2004
$e_{\text{ing}}(i)$ Dose efficace engagée par unité d'incorporation par ingestion pour la substance <i>i</i>	Sv/Bq	Fonction du radionucléide	Valeurs issues du tableau 1.1 de l'arrêté du 1 ^{er} septembre 2003

Liste des références

- [1] Bilan radiologique de l'environnement français de juin 2011 à décembre 2014.
- [2] Arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.
- [3] ANSES (2017). *Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3) - Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective.*
- [4] GRNC (1999) *Modèles de transfert des radionucléides dans l'environnement*, volume 3, annexe viii-2, chapitre 8.
- [5] INSEE (1991) *Enquête Consommation alimentaire des ménages.*
- [6] Arrêté du 12 mai 2004 fixant les modalités de contrôle de la qualité radiologique des eaux destinées à la consommation humaine.
- [7] Parache, V. (2011) *Enquête alimentaire autour du site nucléaire du CEA de Marcoule (2010) : méthodologie et résultats. Rapport IRSN/DEI/SESURE/2011-07.*
- [8] Département Prospective de la consommation (1998) *Enquête sur la consommation alimentaire dans le Nord Cotentin pour la COGEMA CREDOC.*
- [9] Parache-Durand V. (2014). *Enquête alimentaire sur la zone OPE du centre Meuse/Haute-Marne de l'Andra : méthodologie et résultats. Rapport IRSN/PRP-ENV/SESURE/2014-08.*
- [10] IAEA: *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical report series 472. International Atomic Energy Agency.*

5.5. 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 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) (chapitre 1).

Activité spécifique

Activité d'un radionucléide exprimée en Bq/kg de l'élément chimique correspondant. Dans ce rapport, elle est utilisée pour le carbone-14 pour lequel des résultats de mesures sont exprimés en Bq/kg de carbone (chapitre 1).

Aérosol

Suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides ou les deux, présentant une vitesse de chute faible. Dans l'air et dans les conditions normales, cela 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 (chapitre 1).

 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.

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 (chapitre 1).

Autorisation de rejet

Elle fixe, pour chaque installation, les limites des rejets d'effluents liquides et/ou gazeux et les conditions de leur surveillance. 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 quantifier la radioactivité. Le becquerel (Bq) est égal à une désintégration par seconde (chapitre 1).

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 (chapitre 1).

 β global (bêta global)

Indice de radioactivité représentatif de l'activité des radionucléides émetteurs bêta.

BNEN

Bureau 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

Chapitre 1.

Bruit de fond métrologique

Chapitre 1.

C

Carreau minier

Installation de surface d'une mine.

CEA

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

Césium (Cs, numéro atomique 55)

Métal rare et toxique dont les caractéristiques chimiques 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

Chapitre 1.

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 en uranium-235. Cet uranium est utilisé sous la forme d'oxyde d'uranium, particulièrement stable chimiquement.

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 de l'exposition à un rayonnement ionisant (énergie absorbée par la matière par unité de masse et de temps). L'unité légale est le gray par seconde (Gy/s).

Déchet

Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou, plus généralement, tout bien abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon car il n'a plus d'utilisation précise.

Décroissance radioactive ou désactivation

Diminution naturelle de l'activité nucléaire d'une substance radioactive par désintégrations spontanées.

Déconstruction

Regroupe les opérations visant à évacuer les matières et déchets radioactifs, à retirer les matériels présents, à assainir et à démonter les bâtiments d'une installation nucléaire en fin de vie ou à l'arrêt définitif. C'est un projet industriel de très longue durée avec un examen de sûreté à chaque étape afin d'assurer la maîtrise des risques des opérations.

Descenderie

Voie inclinée par laquelle on accède, en descendant, à une zone minéralisée pour l'extraction minière.

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

Chapitre 1.

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

Énergie alpha potentielle (EAP)

L'énergie alpha potentielle volumique ou EAPv est un paramètre utilisé pour quantifier physiquement l'énergie qui peut potentiellement se déposer dans les voies respiratoires par désintégration des descendants du radon (chapitre 1). Il est utilisé pour la surveillance des travailleurs et des sites miniers. Il s'exprime en J/m³ (joule par mètre cube).

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 afin de mesurer le tritium organiquement lié.

Eau de déshydratation

Eau obtenue après séchage de l'échantillon (le plus souvent par lyophilisation) permettant l'analyse du tritium libre.

EDF

Électricité de France.

Effluent

Tout fluide, liquide ou gazeux, issu de l'installation, susceptible d'être rejeté dans le milieu récepteur directement ou indirectement.

Électron

Particule élémentaire chargée d'électricité négative. Il entre dans la composition des atomes (chapitre 1).

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.) (chapitre 1).

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), etc.

Fissile

Se dit d'un noyau atomique pour lequel 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

Éclatement du noyau d'un atome sous l'action de neutrons. Cette réaction est accompagnée d'une émission de neutrons, de rayonnements ionisants et d'un fort dégagement de chaleur. C'est ce dernier qui est utilisé pour créer l'énergie électrique dans une centrale électronucléaire.

Fusion

Formation, à partir de deux noyaux légers, d'un noyau lourd. Cette réaction est accompagnée d'un dégagement d'énergie. Des recherches sont en cours pour utiliser l'énergie dégagée par la fusion pour produire de l'électricité.

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 (chapitre 1).

Gaz rares

Gaz dépourvus d'affinité chimique et ne donnant aucun composé. Ce sont l'argon, l'hélium, le krypton, le néon, le xénon et le radon. Certains isotopes des gaz rares sont des produits de fission et sont donc radioactifs.

Gestion des déchets radioactifs

Ensemble des dispositions et opérations, réglementaires ou techniques, relatives aux déchets radioactifs depuis leur production jusqu'à leur stockage inclusivement, destiné à assurer la protection des personnes et de l'environnement.

Gray (Gy)

Unité d'énergie transmise à la matière par unité de masse (joule par kg) lors de l'absorption de la dose de rayonnement.

GSIEN

Groupement de scientifiques pour l'information sur l'énergie nucléaire.

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.

HCTISN

Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire : instance d'information, de concertation et de débat sur les risques liés aux activités nucléaires.

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.

Iode (I, numéro atomique 53)

Corps simple dont les isotopes radioactifs sont présents dans les produits de fission. Tous les iodes radioactifs (129, 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 radioactive est de près de 16 millions d'années.

IRSN

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

Isotopes

Atomes possédant 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 naturel de masse 40 (^{40}K).

L

Légumes feuilles

Légumes dont on consomme tout ou partie des feuilles et tiges : salades, épinards, choux, poireaux...

Légumes fruits

Légumes dont on consomme le fruit : tomate, aubergines, poivron, pois, haricots...

Légumes racines

Légumes dont on consomme la racine, le tubercule ou le bulbe : carotte, pomme de terre, oignon, radis...

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.

Minerai

Il s'agit d'une roche contenant des minéraux utiles en proportion suffisamment intéressante pour justifier l'exploitation.

Montage

Voie inclinée par laquelle on accède, en montant, à une zone minéralisée pour l'extraction minière.

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 » (80 m³/h) et « TGD » (très grand volume : 700 m³/h) (chapitre 1).

Orano

Groupe industriel français intervenant notamment dans le cycle du combustible et la fabrication d'installations nucléaires, anciennement dénommé AREVA.

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 (chapitre 1).

Personne représentative (de la population)

Tel que défini dans la Directive Euratom 2013/59 du 5 décembre 2013 : « Personne recevant une dose qui est représentative des personnes les plus exposées de la population à l'exclusion des personnes ayant des habitudes extrêmes ou rares ».

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.

Produit d'activation

Radionucléide artificielle produit par capture d'un neutron à partir d'un atome stable ou non.

Produit de fission

Radionucléide produit par la fission nucléaire d'un noyau lourd ou par la désintégration radioactive de nucléide formé selon ce processus.

Proton

Particule élémentaire chargée positivement, constituant le noyau de l'atome avec le neutron.

R

Radioactivité

Propriété de certains atomes dont les noyaux se désintègrent spontanément pour former d'autres atomes en émettant des rayonnements ionisants.

Radionucléide

Isotope radioactif d'un élément. Exemples : ³H : tritium, isotope radioactif de l'hydrogène ; ¹⁴C : 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 des rayonnements ionisants 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). Le ^{222}Rn est souvent le plus important à considérer de par sa période radioactive plus longue : 3,8 j.

Rayonnement

Transfert d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques (gamma) ou de particules (alpha, bêta, neutrons) émis lors de la désintégration de radionucléides.

Rayonnement ionisant

Rayonnement susceptible d'arracher des électrons à la matière (chapitre 1).

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.

Résidus miniers

Désigne les produits restant après extraction de l'uranium contenu dans le minerai par traitement statique ou dynamique. Ils contiennent les descendants de l'uranium-238, en particulier le radium-226.

RNM

Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement.

RNR

Réacteur à neutrons rapides.

S

SCL

Service commun des laboratoires (service à compétence nationale rattaché conjointement à la DGCCRF et à la Direction générale des douanes et droits indirects). 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'Orano, 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 (chapitre 1).

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 (chapitre 1).

Significatif (mesure ou résultat significatif)

Résultat de mesure supérieur au seuil de décision (chapitre 1).

SOCATRI

Filiale d'Orano (ex-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 radionucléides et de quantifier 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 d'un débit de prélèvement de 80 m³/h.

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 le neptunium (93), le plutonium (94), l'américium (95), le 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. Ils sont actuellement en déconstruction.

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.

5.6. COMITÉ ÉDITORIAL

Coordination éditoriale et réalisation

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
Pôle Santé et Environnement
Direction de l'Environnement

Pilotage

Lionel SAEY
Philippe RENAUD

Rédaction

Christelle ANTONELLI
Magali BEGUIN-LEPRIEUR
David CLAVAL
Vanessa DURAND
Laëtitia FURMANIAK
Marie-Odile GALLERAND
Mélanie HELLER
Grégory LEFRANÇOIS (CLI de Gravelines)
Stéphane LORTHIOIR
Grégory MATHIEU
Floriane MEUNIER
Maxime MORIN
Michaël PETITFRERE
Olivier PIERRARD
Laurent POURCELOT
Céline QUENNEVILLE
Philippe RENAUD
Lionel SAEY

Représentations cartographiques

Jean-Michel METIVIER

Relecture

Membres du COPIL du RNM

Pour toute information complémentaire, vous pouvez contacter :

Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire
Direction de l'Environnement
31, avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses

E-mail

contact@irsn.fr

N° du rapport

IRSN 2024-00600

Tous droits réservés IRSN

Décembre 2024

Photo de couverture :

© IRSN/O. Masson – Station de prélèvement d'aérosols atmosphériques du pic du Midi (65)

Conception graphique-réalisation :

Agence Kazoar – www.kazoar.fr

Impression :

Handiprint entreprise adaptée, qui emploie 150 personnes en situation de handicap, sur du papier PEFC issu de forêts gérées durablement.



31, avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

COURRIER

BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

TÉLÉPHONE

+33 (0)1 58 35 88 88

SITE INTERNET

www.irsn.fr

E-MAIL

contact@irsn.fr

 [@IRSNFrance](https://twitter.com/IRSNFrance), [@radioprotection](https://twitter.com/radioprotection)