



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

BILAN DE L'ÉTAT RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS DE 2018 À 2020



MEMBRE DE

ETSON



réseau national

Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement

BILAN DE L'ÉTAT RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS DE 2018 À 2020

SOMMAIRE

01. LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	4
1.1. OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	6
La surveillance radiologique de l'environnement répond à différents objectifs	7
1.2. LES DISPOSITIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	12
La surveillance du compartiment atmosphérique	12
La surveillance du compartiment aquatique	17
La surveillance du compartiment terrestre	21
Synthèse des critères stratégiques et des dispositifs de prélèvement et de mesure associés à la surveillance radiologique des différents compartiments de l'environnement	23
1.3. DU PLAN DE PRÉLÈVEMENT AUX RÉSULTATS DE MESURE	25
Plans de prélèvement et d'analyse	25
Préparation des échantillons	25
Analyses radiologiques	25
1.4. LE RÉSEAU NATIONAL DE MESURES DE LA RADIOACTIVITÉ DE L'ENVIRONNEMENT (RNM)	27
Le site Internet de référence des mesures de la radioactivité de l'environnement en France	27
Le fonctionnement du RNM	28
L'agrément des laboratoires	31
1.5. MODALITÉS DE PRÉSENTATION ET D'EXPLOITATION DES RÉSULTATS DE MESURE DANS LE BILAN RADIOLOGIQUE 2018-2020	39
Origine des données et unités	39
Seuils de décision, résultats non significatifs, incertitudes métrologiques et arrondis	40
Moyennes et autres indicateurs statistiques	41
02. LE « BRUIT DE FOND » RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	42
2.1. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE NATUREL	44
Le rayonnement cosmique et les radionucléides cosmogéniques dans l'environnement	44
Les radionucléides telluriques dans l'environnement	46
2.2. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE RÉMANENT DES RETOMBÉES ANCIENNES	55
Retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires	55
Retombées de l'accident de Tchernobyl	67
Retombées de l'accident de Fukushima	72
2.3. GAMMES D'ACTIVITÉS MASSIQUES ET VOLUMIQUES DU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	72
2.4. GAMME DES DOSES À LA POPULATION, LIÉES AU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	84
Doses efficaces externes liées aux rayonnements cosmique et tellurique	84
Doses efficaces par ingestion de radionucléides naturels via l'alimentation et le tabagisme	84
Dose efficace liée à l'inhalation de radon	86
Doses efficaces liées à la rémanence des retombées anciennes de radionucléides artificiels	87
Bilan des doses efficaces liées au bruit de fond radiologique français	87
03. DONNÉES RELATIVES AUX DIFFÉRENTS SITES NUCLÉAIRES FRANÇAIS	90
3.1. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ (CNPE) EN EXPLOITATION	92
Les rejets d'effluents radioactifs	93
Les plans de surveillance de l'environnement d'un CNPE	94
Influence des CNPE sur leur environnement et expositions du public associées	96
Influence des rejets d'effluents liquides tritiés	119
Influence des CNPE sur les activités de tritium dans les eaux de boisson et les eaux souterraines	126
Influence des rejets liquides d'autres radionucléides	128
Conclusion générale	132
3.2. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN COURS DE DÉCONSTRUCTION	134
Le site de Creys-Malville	134
Le site de Brennilis	141
3.3. LES SITES INDUSTRIELS	146
Le site de Malvézi	146
Le site Orano du Tricastin	152
Le site de Romans-sur-Isère	160
Le site de La Hague	165
Le centre de stockage de l'Aube et le centre de stockage de Morvilliers	204
3.4. LES SITES DE RECHERCHE	210
Le site de Bruyère-le-Châtel	210
Le site de Cadarache	216
Le site du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds) à Caen	222
Le site CEA de Fontenay-aux-Roses	227
Centre CEA et Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble	233
Le site de Marcoule (Gard)	242
Le site de Saclay	255
Le site de Valduc	266

3.5. LES BASES NAVALES NUCLÉAIRES	278
Description	278
Les rejets radioactifs	279
La surveillance radiologique de l'environnement	280
Influence des sites sur l'environnement	283
3.6. SYNTHÈSE DOSIMÉTRIQUE	292
04. INSTALLATIONS CLASSÉES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (ICPE)	296
4.1. INTRODUCTION	298
4.2. LE SITE DE MANGE GARRI	299
4.3. LES SITES DE STOCKAGES DE PHOSPHOGYPSES	302
Production et stockage	302
Prélèvements et analyses en laboratoire	303
Mesures <i>in situ</i>	304
4.4. LA SOMANU	306
Les rejets radioactifs	306
Surveillance radiologique de l'environnement du site	308
Influence sur le milieu terrestre	309
Influence sur le milieu aquatique	310
05. LES ANCIENS SITES MINIERS	312
5.1. INTRODUCTION	314
Généralités sur les sites miniers	315
5.2. INFLUENCE POTENTIELLE DES ANCIENS SITES MINIERS SUR LEUR ENVIRONNEMENT ET EXPOSITIONS DU PUBLIC	318
5.3. LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT AUTOUR DES ANCIENS SITES MINIERS	318
Aspects réglementaires	318
Description générale des dispositifs de surveillance	319
5.4. PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DU SITE INDUSTRIEL DE BESSINES	319
Présentation générale du Site Industriel de Bessines	321
Plan de surveillance	323
Rayonnement gamma et qualité de l'air	326
Les eaux de surface	328
Les sédiments	332
La chaîne alimentaire	332
06. ÉLÉMENTS D'ACTUALITÉ SUR LA PÉRIODE 2018-2020	334
6.1. INCENDIES DE FORÊT EN UKRAINE DANS LA RÉGION DE TCHERNOBYL EN AVRIL 2020	336
6.2. REJET ACCIDENTEL DE SÉLÉNIUM-75 PAR UNE INSTALLATION BELGE EN MAI 2019	339
6.3. INCENDIE SUR LE SITE DE LA HAGUE EN FÉVRIER 2020	343
6.4. INCENDIE DANS LE SOUS-MARIN « PERLE » À TOULON EN JUIN 2020	347
Mesures du réseau de surveillance de l'IRSN	347
Campagne réactive de mesures <i>in situ</i>	348
Mesures réactives dans le véhicule laboratoire « environnement » et mesures différées dans les laboratoires fixes de l'IRSN	349
6.5. ÉTUDE SUR LE TRITIUM DANS LES NAPPES PHRÉATIQUES	351
6.6. CAMPAGNE D'ÉTUDE DU TRITIUM DANS LA LOIRE À SAUMUR	359
07. COMPRENDRE LA RADIOACTIVITÉ ET LES EXPOSITIONS DES PERSONNES QU'ELLE PEUT ENGENDRER	364
7.1. LES RADIONUCLÉIDES	366
7.2. LES RAYONNEMENTS	367
7.3. L'ACTIVITÉ : LES BECQUERELS (Bq)	367
7.4. LA PÉRIODE RADIOACTIVE	368
7.5. LES MODES D'EXPOSITION À LA RADIOACTIVITÉ ENVIRONNEMENTALE	368
7.6. LA DOSE : LE SIEVERT (Sv)	370
7.7. LA RADIOPROTECTION	373
08. LES SOURCES D'INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ ET LA DIFFUSION DES DONNÉES	374
8.1. SITES INTERNET ET SUPPORTS D'INFORMATION DU PUBLIC	376
8.2. DIFFUSION D'INFORMATION DANS LE CADRE DE TRAITÉS OU CONVENTIONS INTERNATIONALES	379
09. ANNEXES	380

Mesure du tritium par scintillation liquide





01

LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

1.1. OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	6
La surveillance radiologique de l'environnement répond à différents objectifs	7
1.2. LES DISPOSITIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	12
La surveillance du compartiment atmosphérique	12
La surveillance du compartiment aquatique	17
La surveillance du compartiment terrestre	21
Synthèse des critères stratégiques et des dispositifs de prélèvement et de mesure associés à la surveillance radiologique des différents compartiments de l'environnement	23
1.3. DU PLAN DE PRÉLÈVEMENT AUX RÉSULTATS DE MESURE	25
Plans de prélèvement et d'analyse	25
Préparation des échantillons	25
Analyses radiologiques	25
1.4. LE RÉSEAU NATIONAL DE MESURES DE LA RADIOACTIVITÉ DE L'ENVIRONNEMENT (RNM)	27
Le site Internet de référence des mesures de la radioactivité de l'environnement en France	27
Le fonctionnement du RNM	28
L'agrément des laboratoires	31
1.5. MODALITÉS DE PRÉSENTATION ET D'EXPLOITATION DES RÉSULTATS DE MESURE DANS LE BILAN RADIOLOGIQUE 2018-2020	39
Origine des données et unités	39
Seuils de décision, résultats non significatifs, incertitudes métrologiques et arrondis	40
Moyennes et autres indicateurs statistiques	41



01

LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

1.1. OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

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

- les exploitants d'installations nucléaires (Andra⁽¹⁾, CEA⁽¹⁾, EDF⁽¹⁾, ILL⁽¹⁾, Marine nationale⁽¹⁾ et Orano⁽¹⁾...) qui réalisent une surveillance locale autour de leurs sites nucléaires en application de dispositions réglementaires. Pour les installations nucléaires civiles, le programme de surveillance de l'environnement à mettre en œuvre est fixé 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. Ce programme peut le cas échéant, être précisé et adapté aux spécificités locales dans des décisions de l'ASN propres à chaque site. Pour les anciens sites miniers, le programme de surveillance à mettre en œuvre est défini par arrêté préfectoral ;
- l'IRSN⁽¹⁾, l'ASN⁽¹⁾, les ministères (ministère des Solidarités et de la Santé, DGAL⁽¹⁾, DGCCRF⁽¹⁾...), les services de l'État et les autres acteurs publics qui ont pour mission de réaliser une surveillance du territoire national ou qui réalisent des missions de contrôle ou de surveillance sur des secteurs particuliers (les denrées alimentaires pour ce qui concerne par exemple les ministères chargés de l'agriculture et de la consommation) ;

- les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA⁽¹⁾), les collectivités locales, les associations (CLI⁽¹⁾, associations de protection de l'environnement) qui réalisent des surveillances indépendantes des pouvoirs publics.

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



Analyse par spectrométrie alpha

© Y. Geoffroy/Orano

(1) Voir glossaire du chapitre 9.4.

La surveillance radiologique de l'environnement répond à différents objectifs

Objectif n° 1

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

Objectif n° 2

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

Objectif n° 3

Détecter le plus précocement possible une élévation anormale de la radioactivité environnementale, assurer son suivi et contribuer à la détermination de son origine (naturelle ou anthropique).

Objectif n° 4

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

Objectif n° 5

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

Si un résultat donné de mesure ne répond pas forcément aux cinq objectifs, l'ensemble des mesures effectuées par les différents acteurs participe directement ou indirectement aux cinq objectifs de la surveillance de l'environnement. Chaque acteur met en œuvre non pas une, mais des modalités de surveillance (surveillance de routine, alerte et expertises par exemple) qui répondent chacune à des objectifs particuliers. La surveillance autour des sites nucléaires vient en complément du contrôle des rejets par les exploitants. Toutefois, le contrôle des effluents rejetés ne permet pas de s'affranchir d'une surveillance de l'environnement.



Prélèvement de renoncules aquatiques dans la Vienne en aval de Civaux

© IRSN

INCIDENCE DE LA CRISE SANITAIRE SUR LES ACTIVITÉS DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT AUTOUR DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

Les périodes de confinement imposées en 2020 dans le cadre de la crise sanitaire ont pu ponctuellement affecter, mais de façon limitée, la réalisation des programmes de surveillance de l'environnement autour des installations nucléaires.

Dans les paragraphes ci-après, les exploitants nucléaires présentent brièvement les dispositions qu'ils ont prises pour maintenir ces programmes dans toute la mesure du possible, en lien avec les autorités compétentes.

Andra

Durant le premier confinement national lié à la pandémie de Covid-19 du 17 mars au 11 mai 2020, le choix de l'Andra a été de maintenir la surveillance des rejets et de l'environnement, dans la mesure du possible.

La disponibilité des prestataires préleveurs, des laboratoires (internes et externes), des consommables et des transporteurs (acheminement des échantillons vers les laboratoires extérieurs) ont ainsi permis le maintien des programmes de surveillance réglementaire radiologique des Centres de stockage de l'Aube et de la Manche, dans leur quasi-totalité.

Parmi les éléments de la surveillance réglementaire de l'environnement, seule la mesure intégrée du rayonnement gamma ambiant a été réalisée de façon dégradée : en effet, en accord avec le fournisseur de dosimètres, les dosimètres de clôture exposés en mars ont été laissés en clôture entre avril et juin 2020 ; la surveillance est donc restée effective mais avec une période d'intégration de 4 mois au lieu de 1 mois.

EDF

Pendant la crise Covid, EDF a mis en place, dès mars 2020, des plans de continuité d'activité sur chacun des Centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) pour maintenir la capacité de production (y compris la surveillance de l'environnement) et assurer l'approvisionnement électrique de la France en toute sûreté conformément à sa mission de service public. La crise sanitaire a néanmoins eu quelques impacts sur le fonctionnement des équipes des laboratoires d'EDF ainsi que sur celles de ses laboratoires partenaires. Pour pallier les difficultés de transport d'échantillons et/ou de prise en charge d'échantillons rencontrées, ces derniers ont été, en fonction des matrices concernées, soit conservés en chambre froide, soit congelés dans l'attente de leur prise en charge. L'impact sur la réalisation des analyses de surveillance de la radioactivité de l'environnement a donc été limité. En parallèle et afin de permettre une adaptation aux ressources disponibles sur sites, plusieurs réunions d'échanges ont eu lieu avec l'ASN afin d'examiner des possibilités d'aménagements vis-à-vis des activités à réaliser. Les aménagements accordés par l'ASN ont uniquement concerné des délais supplémentaires temporaires pour la réalisation de certaines analyses ou la transmission de certains documents.

Il est à noter qu'en ce qui concerne la surveillance de l'environnement, activité jugée prioritaire intégralement maintenue, aucun dispositif de prélèvement ou de mesure en continu n'a été arrêté. La situation a été gérée selon une approche graduée dans le strict respect de la réglementation et selon une priorisation des activités de surveillance en fonction de leur périodicité et des possibilités de décalage temporel des opérations de prélèvements et d'analyses.

Durant le second confinement, les CNPE EDF ont également assuré la continuité de la production d'électricité en toute sûreté. Ce deuxième confinement n'a eu aucun impact sur la réalisation de la surveillance de la radioactivité de l'environnement.





CEA

La crise sanitaire liée à l'épidémie de Covid-19 a eu un impact sur les activités du CEA. Pour répondre à la première période de confinement strict décidé par le gouvernement dès le printemps 2020, le CEA a activé un Plan de Continuité d'Activité (PCA) afin de mettre en état sûr ses installations dans un contexte d'effectif réduit sur les centres. Les mesures prises par le CEA dans ce cadre ont notamment permis de mobiliser du personnel et d'adapter ses moyens pour permettre le maintien de la surveillance environnementale et le contrôle des rejets déclinés dans les prescriptions individuelles des centres. Le CEA a par ailleurs régulièrement tenu informées les autorités compétentes des dispositions mises en œuvre afin de respecter ses obligations réglementaires concernant les prélèvements et mesures environnementales. En particulier, les Autorités ont été informées des mesures compensatoires prises pour mener à bien toutes les activités en relation avec les programmes de surveillance de l'environnement en termes de délais, de traitement, d'élaboration des bilans et de publication des données environnementales du CEA. Ces mesures ont essentiellement porté sur quelques reports d'échéance avec des adaptations de certaines fréquences de prélèvement pour les mesures en différé, en utilisant des conditions de conservation des échantillons conformes aux prescriptions techniques normatives en la matière. Enfin, le CEA a ensuite ajusté son PCA pour répondre à la seconde période de confinement de l'automne 2020 qui n'a pas impacté de manière aussi significative les actions à effectuer au titre de la surveillance environnementale sur les centres, du fait d'un confinement plus souple et du retour d'expérience tiré de la première vague de l'épidémie.

Orano

Pour faire suite aux annonces gouvernementales de mars 2020, Orano Chimie-Enrichissement du Tricastin et de Malvési et Orano Recyclage La Hague ont mis en œuvre tous les moyens et les dispositions nécessaires permettant d'assurer l'ensemble de la surveillance environnementale prescrite autour de leurs sites dans les décisions de l'ASN ou arrêtés ministériels encadrant les rejets des installations, sans aucun allègement lié à la crise sanitaire.

Pour le site du Tricastin, seule la surveillance dosimétrique, via des dosimètres passifs en clôture du site, a été provisoirement impactée pendant la période de confinement de mars à mai 2020. En effet, le laboratoire agréé prestataire a été contraint de fermer, et d'un commun accord, les dosimètres mensuels ont été laissés en place pour une période de 2 mois. Les résultats du suivi dosimétrique sont restés cohérents avec la chronique habituelle du site. Pour le site de Malvési, la totalité du programme de surveillance a pu être réalisée. Enfin, pour le site de La Hague, il n'y a pas eu d'impact sur le programme de surveillance qui a été réalisé conformément au planning prévisionnel. On notera juste que les 3 prélèvements d'eau potable habituels ont été remplacés, en accord avec les autorités, par une seule mesure en aval de la station de traitement et de distribution de l'eau potable de la communauté de communes de Beaumont suite à l'impossibilité d'y accéder durant la période de confinement.

Orano Mining

Suite aux annonces gouvernementales de mars 2020, Orano Mining a réalisé, après validation des services de tutelle (DREAL et Préfecture), un allègement de la surveillance actuellement prescrite par arrêtés préfectoraux. Ainsi, pendant la période de confinement strict de mars à mai 2020, la priorité a été de maintenir en fonctionnement l'ensemble des stations de traitement des eaux liées aux rejets miniers et/ou ICPE, ainsi que la réalisation des analyses nécessaires pour quantifier leur efficacité (avant traitement, rejet, aval milieu naturel). Concernant la surveillance de l'environnement des anciennes mines d'uranium, certaines analyses relatives aux références amont des sites ont été temporairement arrêtées, et les analyses aval des sites ont été réalisées autant que possible. La surveillance de l'environnement des stockages de résidus miniers relevant du régime des ICPE, avec ou sans exutoire, a été maintenue à l'exception de quelques prélèvements durant la dernière quinzaine de mars. À partir de mai 2020, la surveillance de l'ensemble des anciennes mines et des ICPE a repris telle que prescrite par les arrêtés préfectoraux, sans aucun allègement lié à la crise sanitaire.

FOCUS BILAN DES CONSTATS RADIOLOGIQUES RÉGIONAUX

La surveillance radiologique de l'environnement effectuée par ses différents acteurs (exploitants, IRSN, associations), porte essentiellement sur le voisinage des sites nucléaires. Hors de l'influence locale des rejets

de ces sites, la connaissance du « bruit de fond » radiologique tel que défini dans le chapitre 2, est essentiellement assurée par l'IRSN.

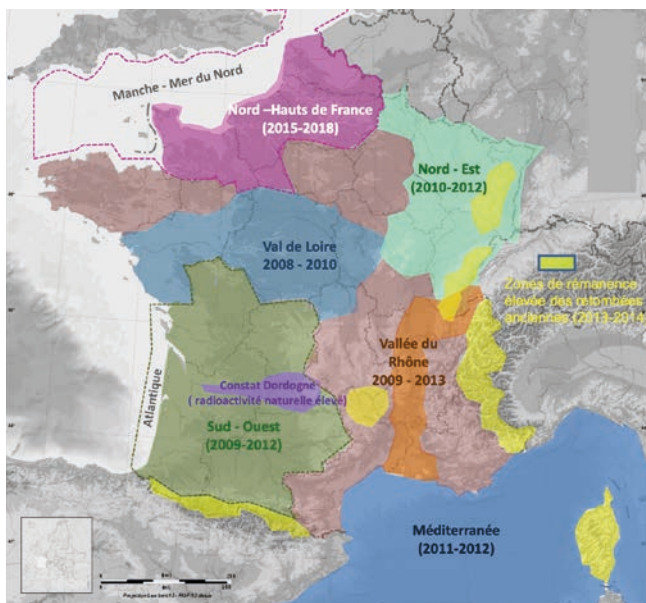
Mettre à jour la connaissance que l'on a de ce bruit de fond répond à plusieurs objectifs : estimer les expositions des populations qui en résultent, déterminer les activités ajoutées à ce bruit de fond du fait des rejets des installations nucléaires dans l'éventualité d'un accident ou de tout évènement radiologique susceptible d'augmenter ce bruit de fond.

Par ailleurs, la surveillance « de routine », qu'elle soit effectuée à proximité ou à distance des installations, ne peut porter que sur un nombre limité de types d'échantillons : herbages, légumes feuilles, lait et feuilles d'arbres (pour le tritium et le carbone-14) prélevés sur un nombre limité de stations.

De plus, la quantification par la mesure des très bas niveaux d'activités massiques et volumiques nécessite d'utiliser les moyens métrologiques les plus performants disponibles, notamment à l'IRSN.

Enfin, il était important de prendre en compte le fait que la situation radiologique de la quasi-totalité du territoire français, non influencée par les installations nucléaires, évolue peu (sur plusieurs années à quelques décennies).

Sur la base de ces considérations, l'IRSN a décidé de lancer en 2008, complémentairement à son plan de surveillance de routine, une série de campagnes de caractérisation radiologique des territoires, appelées « constats radiologiques régionaux ». L'objectif était d'obtenir une image de la radioactivité de l'environnement français en élargissant la surveillance de routine à d'autres types de prélèvements (notamment aux productions agricoles et d'élevage les plus importantes ou emblématiques de chaque « région »), à d'autres milieux (autres cours d'eau, zones particulières radiologiquement, milieu marin hauturier) et à d'autres radionucléides.



Huit constats radiologiques régionaux ont ainsi été réalisés de 2008 à 2018, couvrant la majeure partie du pays (carte ci-contre). Le dernier rapport relatif au constat « Normandie et Hauts-de-France » a été publié en 2021 et le rapport faisant le bilan de ces constats en ce qui concerne le bruit de fond des radionucléides artificiels sera publié en 2022. Bien que répondant à un objectif commun et de ce fait partageant une stratégie globalement commune, les constats régionaux présentaient chacun leurs spécificités dont certaines sont données ci-après à titre d'illustration.



L'objectif général exposé précédemment a été pleinement rempli. Les constats régionaux ont fortement contribué, voire ont été déterminants, pour la connaissance du bruit de fond des radionucléides artificiels. Ainsi, entre 30 % et 70 % des résultats de mesure disponibles sur la période 2008-2019 pour le césium-137 et le strontium-90 dans les légumes, les fruits, les viandes et les fromages, ont été acquis dans ce cadre.

Le constat radiologique dédié aux zones de rémanence élevée des retombées anciennes (cf. focus p. 70 du BR 2015-2017) a permis d'identifier les zones concernées et de caractériser les niveaux les plus élevés de ces deux radionucléides ainsi que ceux de plutonium, rémanents des retombées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl.

Dans le cas du tritium et du carbone-14, les analyses de denrées faites dans le cadre des constats radiologiques régionaux, et notamment dans le cadre des constats « Sud-Ouest », « Val-de-Loire » et « Vallée du Rhône » ont permis de confirmer l'assertion théorique selon laquelle leurs concentrations dans les herbages et les feuilles d'arbre prélevés dans le cadre de la surveillance de routine sont bien représentatives de celles des denrées.

Les résultats de la surveillance radiologique du milieu aquatique continental portant principalement sur les grands cours d'eau en aval des points de rejets des installations nucléaires, les constats « Sud-Ouest », « Normandie et Hauts-de-France » et « Vallée du Rhône » ont permis de disposer de données sur les eaux, les plantes aquatiques, les sédiments et dans une moindre mesure sur des poissons prélevés dans une vingtaine de plus petits cours d'eau.

Le constat radiologique « Méditerranée » et le volet marin du constat « Normandie et Hauts-de-France » ont permis d'élargir au tritium, au carbone-14 et aux actinides, la connaissance du bruit de fond des radionucléides artificiels en milieu marin qui se limitait jusqu'alors essentiellement au seul césium-137, de mieux quantifier l'influence des rejets liquides du site de La Hague en Manche, et d'améliorer notre connaissance des niveaux des radionucléides naturels dans ce milieu, et notamment ceux du polonium-210 qui est un contributeur majeur à l'exposition de la population (cf. focus pp. 79-83 du chapitre 2).

Les constats radiologiques « Nord-Est » et « Vallée du Rhône » ont permis d'actualiser les connaissances des bruits de fonds radiologiques locaux liés à des rejets passés : celui de tritium rémanent des rejets des industries horlogères dans les cours d'eau de Franche-Comté, celui de plutonium dans les zones anciennement influencées par les rejets du site de Marcoule.

Les données acquises dans le cadre de la surveillance de routine portant essentiellement sur des bassins et vallées sédimentaires (où se trouvent les sites nucléaires français) dont les sols sont relativement pauvres en uranium et thorium, le constat « Dordogne » a permis d'améliorer la connaissance que l'on a des zones à hauts niveaux de radioactivité naturelle.

Les constats radiologiques ont également été l'occasion de tester l'utilisation de dispositifs de surveillance comme les piègeurs passifs de tritium atmosphérique (cf. focus sur les piègeurs passifs pp. 14-15 du BR 2015-2017) ou les stations à grand débit d'aspiration à proximité des sites nucléaires dans le cadre des constats « Sud-Ouest », « Vallée du Rhône » et « Normandie et Hauts-de-France ». Suite à ces tests, ces dispositifs ont pu être déployés lors de l'étude radiologique du site de Saint-Alban (cf. focus pp. 108-112 du chapitre 3.1).

Enfin, outre les données acquises dans leur cadre, les constats radiologiques régionaux ont également été l'opportunité de réaliser une synthèse de l'ensemble des données sur le bruit de fond des radionucléides artificiel dans l'environnement français dont quelques résultats sont présentés dans les deux focus pp. 61-66 (pour le carbone-14 et le tritium) et 69-71 du chapitre 2.

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

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

- la surveillance en continu *in situ* par des systèmes autonomes (réseaux de télésurveillance) permettant la transmission en temps réel des résultats. Ces dispositifs (figure 1A) sont principalement utilisés pour donner l'alerte en cas d'accident de grande ampleur. Parmi ces systèmes, on trouve notamment :
 - les réseaux des balises de débit de dose gamma ambiant (ex. : réseau Téléray pour l'IRSN, les balises des exploitants situées autour des sites),
 - le réseau Hydrotéléray de l'IRSN pour la surveillance des principaux cours d'eau par spectrométrie gamma, en aval de toutes les installations nucléaires et avant leur sortie du territoire national ;
- le traitement et la mesure en laboratoire d'échantillons prélevés dans différentes composantes de l'environnement. Le prélèvement des échantillons s'effectue *via* deux méthodes :
 - des prélèvements ponctuels d'échantillons environnementaux. Ces échantillons concernent des matrices variées : les eaux (de pluie, douces de surface, souterraines ou marines), les indicateurs biologiques (mousses, algues), les sols et les sédiments, ainsi que les denrées (lait et produits laitiers, viande, poisson, mollusques, crustacés, céréales...),
 - des dispositifs de prélèvement en continu. Ces prélèvements concernent essentiellement les mesures effectuées dans le compartiment atmosphérique (aérosols, mesures de radionucléides spécifiques dans l'air comme le tritium et le carbone-14) et dans les eaux de surface (prélèvements par hydrocollecteurs).

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.

Les dispositifs de prélèvements et de mesures déployés, et les types d'analyse effectués en France par les nombreux acteurs qui participent à la surveillance radiologique de l'environnement peuvent donc être différents. Certains dispositifs sont adaptés aux objectifs assignés aux exploitants nucléaires dans le cadre de la surveillance réglementaire de leurs installations, tandis que d'autres acteurs utilisent des équipements de prélèvement et des techniques d'analyses beaucoup plus performants permettant d'atteindre des seuils de décision (cf. chapitre 1.5) nettement plus bas pour répondre à des objectifs différents. Dans la base de données du RNM, cela se traduit par la coexistence de résultats issus de sources différentes et obtenus selon des gammes analytiques différentes.

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

La surveillance du compartiment atmosphérique

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

Mesure en continu du débit de dose gamma ambiant

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

Dosimétrie passive environnementale

La surveillance en temps réel présentée précédemment peut être complétée en France par une surveillance par dosimétrie passive (figure 1B) effectuée à l'aide de dosimètres radio-photo-luminescents (RPL) implantés sur le périmètre des

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

FIGURE 1 / SONDE DE MESURE EN CONTINU DU DÉBIT DE DOSE GAMMA AMBIANT DU RÉSEAU TÉLÉRAY DE L'IRSN, INSTALLÉE À L'OBSERVATOIRE DU PIC DU MIDI DE BIGORRE À 2876 M (photo 1A) ET DOSIMÈTRE RPL INSTALLÉ SUR LE SITE DE CADARACHE (photo 1B)

1A



1B



Aérosols atmosphériques

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

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

Réglementairement, les exploitants nucléaires réalisent sur les filtres prélevés quotidiennement une mesure de l'indice d'activité bêta global et, pour certains sites, une mesure de l'indice d'activité alpha global. La mesure de cet indice⁽²⁾ est destinée à déceler toute anomalie importante dans l'activité de l'air et de déclencher alors des investigations complémentaires.

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

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

L'IRSN et certains exploitants nucléaires réalisent systématiquement une spectrométrie gamma sur les filtres d'aérosols. Les performances sont liées principalement au débit d'aspiration et à la durée du comptage. À titre d'exemple, une station bas débit permet de mesurer des activités de césium-137 dans l'air de l'ordre de 0,05 mBq/m³ ; une station haut débit permet de descendre autour de 0,00005 mBq/m³ pour les stations IRSN avec un débit de 700 m³/h. Ce dernier type de station permet ainsi de mesurer le bruit de fond résiduel du césium-137 dans l'air, de l'ordre de 0,0002 mBq/m³, et donc de déceler toute augmentation si faible soit-elle de ce bruit de fond.

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

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



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

Cas particulier des descendants à vie courte du radon-222 ; mesure de l'énergie alpha potentielle (EAP)

Le radon-222 qui s'est dégagé de la roche et a migré à travers le sol vers l'atmosphère se désintègre pour donner successivement des atomes de polonium-218, de plomb-214, de bismuth-214 et de polonium-214 (cf. chapitre 2). Ces radionucléides sont présents dans l'atmosphère sous forme de particules (aérosols) solides, attachées ou non à l'aérosol atmosphérique. Ce sont ces aérosols, et non le radon lui-même qui est un gaz inerte de courte période radioactive (3,8 jours) qui, une fois inhalés, peuvent se déposer dans les voies respiratoires et libérer, par désintégrations successives, des énergies non négligeables aux cellules. Ils sont donc 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 est utilisé pour la surveillance des travailleurs et des sites miniers. Il s'exprime en J/m^3 (joule par mètre cube).

Dans le cas d'un équilibre total, où l'activité de chacun de ces descendants est égale à celle du radon, pour 1 Bq de radon-222, l'EAP est égale à $5,66 \cdot 10^{-9}$ J. Ce facteur permet d'exprimer l'énergie alpha potentielle volumique sous forme de concentration équivalente à l'équilibre (EEC), qui s'exprime en Bq/m^3 .

Un exemple d'appareil de mesure de l'EAP est donné en figure 3. Cet appareil effectue une mesure intégrée de l'EAP dans l'atmosphère sur des durées d'exposition choisies par l'opérateur en fonction de l'objectif fixé.

FIGURE 3 / DISPOSITIF DE MESURE DE L'ÉNERGIE ALPHA POTentielle



Les gaz : tritium (^3H) et carbone-14 (^{14}C)

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

Le prélèvement du tritium atmosphérique est réalisé par barbotage de l'air aspiré dans des pots barboteurs remplis d'eau (figure 4). La teneur en tritium atmosphérique est déterminée à partir de l'analyse du tritium dans l'eau des barboteurs. Deux types de dispositifs sont utilisés dans le cadre de la surveillance en continu des installations : des dispositifs dotés de 2 pots permettant uniquement la mesure du tritium atmosphérique sous forme de vapeur d'eau (tritium HTO), et des dispositifs munis de 4 pots barboteurs permettant d'accéder à la mesure du tritium HTO (2 premiers barboteurs) et des autres formes du tritium atmosphérique, dont le tritium gazeux HT, dans les 2 derniers pots placés en aval d'un four d'oxydation. Cette surveillance est principalement réalisée par les exploitants nucléaires avec des analyses hebdomadaires par scintillation liquide (figure 5).

Le prélèvement de carbone-14 atmosphérique s'effectue par barbotage de l'air aspiré dans de la soude afin de piéger le CO_2 sous forme de carbonates. Outre le CO_2 piégé dans les 2 premiers pots, ces dispositifs à 4 pots piègent également les autres formes carbonées présentes dans l'air (CH_4 ...) dans les 2 pots placés après un four catalytique. Différentes techniques d'analyse du carbone-14 sont utilisées. La principale technique consiste à mesurer le carbone-14, sous différentes formes, par scintillation liquide.

FIGURE 4 / BARBOTEURS POUR LE PRÉLÈVEMENT DU TRITIUM OU DU ^{14}C ATMOSPHÉRIQUE



© DR

Pour le tritium comme pour le carbone-14, certains acteurs qui participent à la mesure de ces radionucléides utilisent des méthodologies permettant d'atteindre ou de s'approcher des valeurs de bruit de fond, notamment par l'utilisation de méthodes d'analyses et de temps de comptage adaptés. Les seuils de décision⁽³⁾ obtenus par les autres acteurs, notamment dans le cadre des mesures de routine, sont cependant cohérents avec les objectifs visés par la surveillance des installations nucléaires.

D'autres radionucléides présents dans les rejets atmosphériques de certaines installations peuvent aussi être prélevés et analysés tels que l'iode atmosphérique (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).

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

FIGURE 5 / APPAREIL DE MESURE PAR SCINTILLATION LIQUIDE



© IRSN

(3) Le seuil de décision est la valeur minimale que doit avoir la mesure d'un échantillon pour que le métrologue puisse « décider » que cette activité est présente et donc mesurée. En dessous de cette valeur, l'activité de l'échantillon est donc trop faible pour être estimée. Ce seuil de décision dépend de la performance et du rayonnement ambiant autour des moyens métrologiques utilisés (cf. p. 40).

Eaux de pluie

Le lessivage de l'atmosphère par les pluies provoque la précipitation sur le sol des radionucléides présents dans l'atmosphère. La surveillance du compartiment atmosphérique est donc complétée par des prélèvements et analyses d'eau de pluie. Des collecteurs (figure 6), relevés à une fréquence hebdomadaire ou mensuelle, récupèrent de façon continue les eaux issues des différents épisodes pluvieux.

Des analyses de l'activité en tritium sont généralement réalisées sur l'eau de pluie. Dans le cadre de la surveillance des sites nucléaires, ces analyses sont souvent accompagnées des indices d'activité bêta global et alpha global⁽⁴⁾, voire de mesures par spectrométrie gamma.

FIGURE 6 / COLLECTEUR D'EAU DE PLUIE



© P. Demail

La surveillance du compartiment aquatique

Eaux et matières en suspension

Milieu récepteur des rejets liquides des installations et des apports éventuels par les eaux de ruissellement, l'eau est le vecteur direct des radionucléides vers le milieu aquatique. La surveillance des eaux (eaux douces, eaux de mer) est effectuée à l'aide de différents dispositifs de prélèvement et d'analyse. Le dimensionnement de cette surveillance est propre à chaque site et dépend notamment des caractéristiques hydrogéologiques, du bruit de fond radiologique et de la présence éventuelle de radionucléides résultant de rejets passés. Implanté sur les 7 principaux fleuves en aval de toute installation nucléaire, le réseau Hydrotéléray (figure 7) de l'IRSN a pour objet de déclencher une alarme en cas d'activités dans le milieu susceptible de résulter d'un rejet accidentel de grande ampleur. À chacune des stations, une mesure par spectrométrie gamma est réalisée durant un temps d'intégration de deux heures pour un débit d'eau de l'ordre de 5 m³/h environ. Les mesures réalisées permettent d'atteindre des seuils de décision d'environ 0,5 à 1 Bq/L pour le ¹³⁷Cs, le ⁶⁰Co et l'¹³¹I. Les données sont automatiquement analysées, stockées et retransmises au centre de contrôle du site IRSN du Vésinet.

FIGURE 7 / STATION HYDROTÉLÉRAY



© DR

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

La surveillance des eaux de surface est aussi réalisée à partir d'hydrocollecteurs permettant des prélèvements automatisés d'eau (figure 8). Ces équipements réalisent des échantillonnages à haute fréquence (toutes les heures environ). Ce dispositif est complété par un bac de décantation relevé mensuellement qui permet de collecter les matières en suspension contenues dans ces eaux.

De nombreux prélèvements ponctuels (instantanés) d'eau de surface sont enfin réalisés sur l'ensemble du territoire national par l'ensemble des acteurs à l'aide d'équipements principalement manuels (figure 9). Ils complètent ainsi les prélèvements réalisés à l'aide des dispositifs semi-automatisés. Par exemple, EDF doit systématiquement effectuer un prélèvement dans le cours d'eau lors de chaque rejet liquide (prélèvement « mi-rejet » également réalisé par hydrocollecteur) pour l'analyse du tritium notamment.

Les eaux souterraines font également l'objet d'une surveillance réglementaire de la part des exploitants via des prélèvements ponctuels. L'objectif est de déceler un éventuel marquage ou de suivre l'évolution d'un marquage ancien. Les eaux souterraines sont pompées grâce à des ouvrages spécialement aménagés : les piézomètres. Les fréquences de prélèvement peuvent être mensuelles à annuelles, voire journalières dans le cas du suivi d'un marquage.

FIGURE 8 / HYDROCOLLECTEUR



© DR

Des analyses de tritium et des activités alpha et bêta globales sont généralement réalisées sur les prélèvements d'eau. Pour certains sites nucléaires, ces mesures sont complétées par une détermination des isotopes de l'uranium ou la recherche de radionucléides spécifiques (spectrométrie gamma, spectrométrie alpha...). Les gammes analytiques peuvent également être très étendues pour les mesures réalisées sur les eaux. À titre d'exemple, les seuils de décision pour le tritium varient entre 2,5 et 10 Bq/L pour la plupart des exploitants (le bruit de fond en tritium dans les eaux douces, hors influence, va de moins de 1 à 2 Bq/L). Dans le cadre de certains programmes d'expertise, des seuils inférieurs à 1 Bq/L peuvent être atteints grâce à la mise en œuvre d'autres techniques de prélèvement et d'analyse. Les analyses de tritium effectuées dans de nombreux cours d'eau en aval d'installations nucléaires permettent de quantifier l'exposition potentielle de la population par ingestion. Les seuils de décision relatifs à la mesure des eaux par spectrométrie gamma varient en France entre 0,0001 et 0,5 Bq/L selon les laboratoires et les objectifs recherchés.

FIGURE 9 / ÉCHANTILLONNAGE PONCTUEL D'EAU À L'AIDE D'UN PRÉLEVEUR HORIZONTAL KEMMERER



© DR

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 (figure 10). Dans le cadre des programmes de surveillance, il s'agit principalement de sédiments de surface prélevés en vue d'obtenir des informations sur la présence éventuelle de radionucléides liée à des rejets récents.

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

FIGURE 10 / PRÉLÈVEMENT DE SÉDIMENTS DANS LA GAFFIÈRE EN AVAL DU SITE NUCLÉAIRE DU TRICASTIN, AU MOYEN D'UN CÔNE DE BERTHOIS



© IRSN

Faune et flore aquatiques

La surveillance du milieu 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.

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

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

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

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

Les échantillons de flore ou de faune aquatique font l'objet de mesures systématiques par spectrométrie gamma afin de rechercher la présence éventuelle de produits d'activation (^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , $^{110\text{m}}\text{Ag}$...) et de produits de fission (^{131}I , ^{129}I , ^{137}Cs , ^{106}Ru ...).

Le spectre des radionucléides analysés dépend des rejets liquides de l'installation surveillée et de sa proximité avec d'autres installations situées en amont ou en champ proche. Certains acteurs de la surveillance centrent également leur stratégie sur l'analyse des radionucléides qui contribuent majoritairement à l'impact dosimétrique (^{14}C et ^3H le plus souvent).

Des mesures complémentaires (^{90}Sr , Pu, Am, U, ^{99}Tc) sont parfois effectuées autour de certains sites autorisés à rejeter ce type de radionucléides, soit en raison de leurs rejets liquides actuels ou passés, soit à cause de marquages anciens.



Échantillonnage de végétaux aquatiques (Jussie) dans la Vienne en aval du CNPE de Civaux



Prélèvement de salade avec enregistrement des coordonnées GPS du lieu de prélèvement

La surveillance du compartiment terrestre

Les végétaux terrestres et les sols

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

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

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



Traitements d'échantillons en vue de la réalisation d'analyses sur des eaux

Les denrées d'origine animale et végétale

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. Seule une partie de l'activité déposée est transférée des feuilles vers les autres organes de la plante (fruits, grains, racines ou 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. Si les teneurs en tritium et en carbone-14 de ces denrées d'origine animale peuvent être du même niveau que celle des denrées végétales, les concentrations des autres radionucléides dans le lait, les viandes et les œufs sont le plus souvent inférieures, voire très inférieures, à celles des végétaux.

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

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

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

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



© P. Bourguignon/Andra

Échantillonnage de lait de vache

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

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

TABLEAU 1 / COMPARTIMENT ATMOSPHERIQUE

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

TABLEAU 2 / COMPARTIMENT TERRESTRE INCLUANT LES DENRÉES ALIMENTAIRES

Compartiment terrestre et denrées	Critères stratégiques associés à la mesure et à l'échantillonnage dans ce compartiment	Dispositifs de prélèvement et/ou de mesure
Végétaux terrestres (herbes, feuilles d'arbres, mousses...)	En raison de leur efficacité à capter les aérosols ainsi que les poussières remises en suspension à partir du sol, les mousses, les lichens, les feuilles d'arbres et l'herbe sont utilisés comme bio-indicateurs pour la surveillance du compartiment atmosphérique.	Prélèvements ponctuels (manuels)
Sols	Pour les radionucléides de période radioactive suffisamment longue (quelques années), les sols constituent des intégrateurs des dépôts qui migrent progressivement en profondeur. Les sols sont à l'origine du transfert des radionucléides vers les légumes, les fruits ou les graminées.	<ul style="list-style-type: none"> • Prélèvements ponctuels (manuels) • Spectrométrie gamma <i>in situ</i>
Productions végétales (céréales, légumes, fruits, vin...)	Dépôt sur les parties aériennes ou absorption par les racines. Risque d'exposition interne après consommation.	Prélèvements ponctuels (manuels, collecte chez les producteurs)
Productions animales (lait, viande, œufs...)	La présence de radioactivité dans l'affouragement entraîne son transfert dans les produits d'origine animale dont le lait, vecteur important de radionucléides (césium, strontium, iode...).	Prélèvements ponctuels (manuels, collecte directe chez les producteurs, dans les abattoirs...)

TABLEAU 3 / COMPARTIMENT AQUATIQUE

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



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

1.3. DU PLAN DE PRÉLÈVEMENT AUX RÉSULTATS DE MESURE

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

Plans de prélèvement et d'analyse

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

Préparation des échantillons

Dès réception au laboratoire, les prélèvements sont traités et conditionnés en fonction des analyses radiologiques auxquelles ils vont être soumis. L'analyse de la radioactivité sur un échantillon prélevé dans l'environnement débute par sa préparation. Celle-ci va du simple conditionnement en récipient de forme normalisée à une préparation plus élaborée comme le séchage, la calcination ou la lyophilisation (figure 11). D'une manière générale, les différentes techniques de traitement des échantillons visent à concentrer un maximum de radioactivité dans un minimum de volume afin de pouvoir détecter la présence de radionucléides à bas voire très bas niveaux. Dans certains cas, la concentration de l'échantillon débute dès son prélèvement grâce aux dispositifs spécifiques mis en œuvre (exemples : prélèvement des aérosols, des matières en suspension...).

Dans la plupart des cas, l'analyse ne nécessite pas d'utiliser l'intégralité de l'échantillon. Celui-ci est alors homogénéisé préalablement afin que la prise pour essai n'induisse pas de biais sur la représentativité de la mesure. La plupart des acteurs de la surveillance effectuent également l'archivage d'une partie des échantillons analysés (filtres, sols et sédiments séchés, échantillons de faune et flore séchés ou calcinés), en vue d'une éventuelle analyse ultérieure par des moyens complémentaires ou plus performants.

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

Analyses radiologiques

Déterminer l'activité d'un radionucléide (cf. définition au chapitre 9 d'annexes) dans un échantillon consiste à estimer la quantité de rayonnement qu'il émet, et ceci par la mesure du rayonnement reçu par un détecteur. Les principales méthodes de détection sont fondées sur le fait qu'un rayonnement crée, au sein de la matière qui les reçoit, des ionisations (arrachements d'électrons aux atomes) et des excitations (transmission d'une quantité d'énergie aux atomes). Ces traces temporaires laissées par le rayonnement dans le détecteur sont amplifiées de manière à être comptées. La prise en compte du rendement du dispositif de mesure permet ensuite de relier le nombre d'impulsions par seconde (ou « coups par seconde ») reçues par le détecteur, au rayonnement émis par l'échantillon et donc à son activité. Du fait notamment des différences importantes dans la distance que peuvent parcourir les différents types de rayonnement (cf. chapitre 4), il existe plusieurs dispositifs et méthodes de mesures :

- la spectrométrie gamma permet d'identifier les radionucléides et de mesurer leur activité pour la plupart des radionucléides émetteurs gamma, dans des échantillons frais, séchés ou incinérés (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co , ^{125}Sb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{131}I , ^{129}I , ^{40}K , ^{210}Pb ...);
- en raison du parcours très faible des rayonnements alpha et leur absorption dans l'échantillon même (diminuant ainsi le rayonnement sortant de l'échantillon qui peut être mesuré), la mesure des radionucléides émetteurs alpha (plutonium, uranium, polonium...) par spectrométrie alpha notamment, nécessite un traitement radiochimique préalable au comptage. Il s'agit d'extraire les atomes radioactifs considérés de l'ensemble de l'échantillon en éliminant tout ou partie de la matière de l'échantillon qui les entoure;
- la radiochimie est également un préalable à la mesure de certains radionucléides émetteurs bêta comme le strontium-90;
- enfin, pour les radionucléides émettant des particules bêta très peu énergétiques comme le tritium ou le carbone-14, l'échantillon est mis en solution de manière à être directement mélangé au liquide scintillant qui permettra leur détection.

La qualité des mesures effectuées est notamment assurée par l'utilisation de traceurs ou de sources étalons de référence spécifiques en termes d'activité, de densité et de nature.

FIGURE 11 / PRINCIPALES ÉTAPES D'UNE ANALYSE DE LA RADIOACTIVITÉ DANS DES ÉCHANTILLONS ENVIRONNEMENTAUX (du prélèvement à la mesure et à l'archivage)



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

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

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

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

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

Le site Internet de référence des mesures de la radioactivité de l'environnement en France

Le réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement centralise l'ensemble des données agréées de surveillance de la radioactivité de l'environnement en France, et s'assure de leur qualité et de leur harmonisation par une procédure d'agrément.

L'une de ses forces est le pluralisme des sources d'information : les mesures proviennent des services de l'État et de ses établissements publics, des exploitants d'installations nucléaires ou d'autres acteurs publics, privés ou associatifs.

Centraliser

Il existe aujourd'hui une veille environnementale abondante et diversifiée dans le paysage nucléaire français, réalisée par une multitude d'acteurs. Les données de la radioactivité de l'environnement, qui sont transmises au RNM, comprennent les résultats des analyses réalisées :

- par les exploitants des installations nucléaires qui, conformément aux exigences réglementaires, assurent la surveillance de l'état radiologique de l'environnement proche de leur installation ;
- par l'IRSN, qui assure une surveillance radiologique du territoire national au titre des missions qui lui sont confiées par le Code de l'environnement ;
- par les collectivités territoriales, les services de l'État et de ses établissements publics en charge du contrôle sanitaire de l'eau et des aliments ;
- par tout autre organisme public, privé ou associatif qui participe à la surveillance radiologique du territoire français.

Le réseau national de mesures collecte et centralise les données de l'ensemble de ces acteurs dans une base de données unique accessible à tous.

Harmoniser et fiabiliser

Afin d'assurer la bonne exploitation de ces données d'origines diverses et de permettre la comparaison et le suivi dans le temps des mesures radiologiques, l'application de méthodes de mesure rigoureuses et homogènes, et de critères d'harmonisation des données telles que les unités d'expression des résultats, est absolument nécessaire.

Pour être déversées dans la base du RNM, les mesures doivent obligatoirement être effectuées par des laboratoires agréés par l'Autorité de sûreté nucléaire. Cet agrément est délivré sur avis d'une commission d'agrément multipartite.

Pour être agréés, les laboratoires doivent satisfaire à deux conditions cumulatives destinées à garantir la fiabilité des mesures :

- se conformer à la Norme internationale NF EN ISO/IEC 17025 qui établit les exigences générales de compétence pour effectuer des essais et/ou des étalonnages, y compris l'échantillonnage ;
- obtenir des résultats satisfaisants aux essais de comparaison inter-laboratoires organisés par l'IRSN. Ces tests d'aptitude consistent à comparer à une valeur de référence les résultats obtenus par les laboratoires sur des échantillons identiques.

Restituer

Depuis 2010, le site www.mesure-radioactivite.fr rend accessibles à tous, en toute transparence, les 300 000 mesures réalisées annuellement en France (soit en 2020 un peu plus de 3,6 millions de données) dans les différents milieux (l'air, l'eau, le sol, la faune et la flore) et les produits alimentaires. Initiative unique en Europe, ce site Internet permet ainsi à chacun d'appréhender la surveillance de la radioactivité réalisée autour de son lieu de vie.

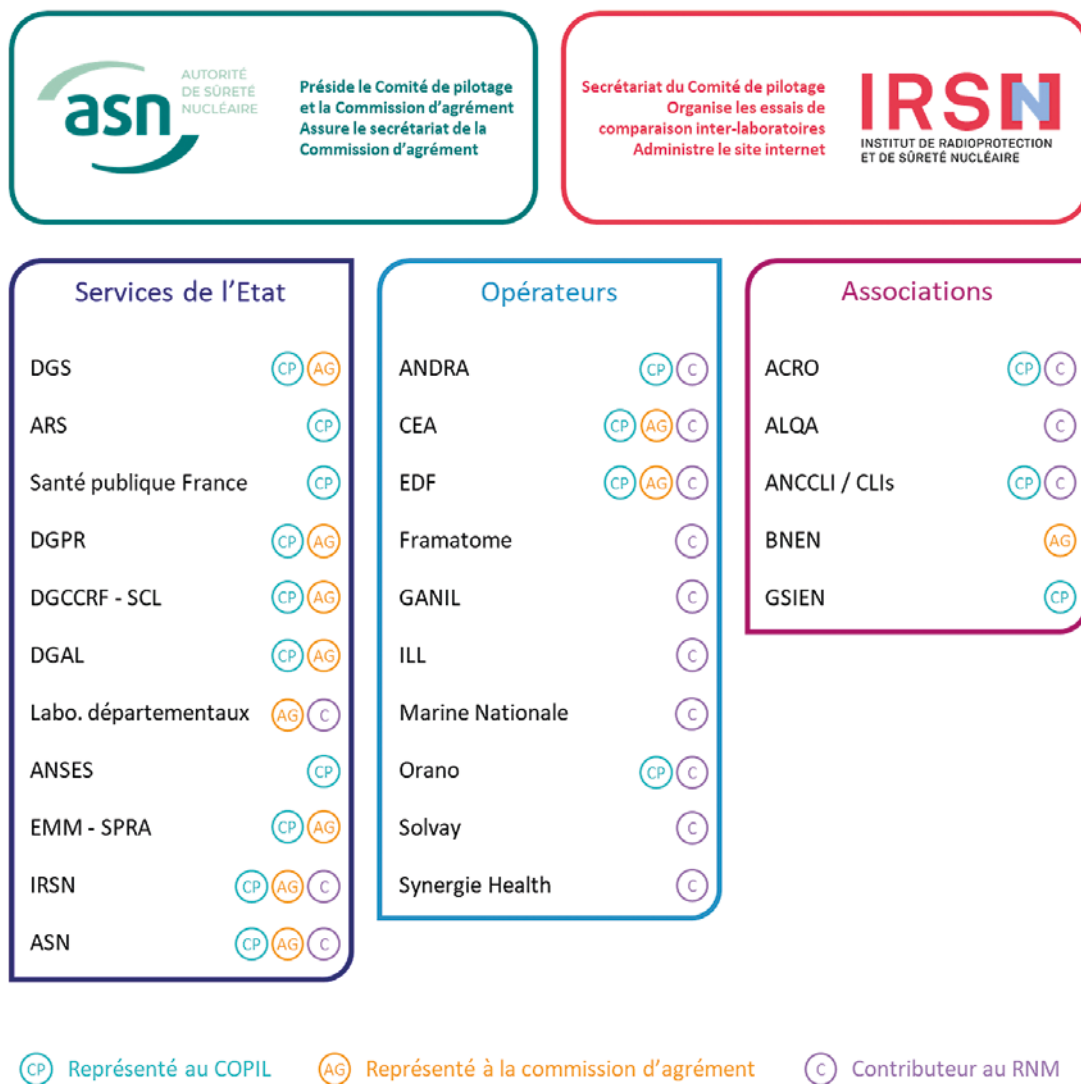
Le site existe également en langue anglaise afin de mieux répondre aux attentes d'un public non francophone.

Le fonctionnement du RNM

Le réseau national est développé sous l'égide de l'ASN. Sa gestion est assurée par l'IRSN, qui comprend notamment la maîtrise d'ouvrage du développement, l'exploitation technique et l'animation du RNM.

Les autres acteurs du réseau comprennent des représentants des principaux ministères concernés, des agences sanitaires, des instituts publics, des industriels du nucléaire, des personnes qualifiées et des associations de protection de l'environnement et des consommateurs. La figure 12 présente le schéma d'organisation du RNM.

FIGURE 12 / SCHÉMA D'ORGANISATION DU RNM



Les instances de pilotage

Le réseau est animé par un comité de pilotage présidé par l'ASN, et chargé de définir les orientations stratégiques. Il se réunit deux fois par an, et les comptes rendus de ces réunions sont disponibles sur le site du RNM. Des groupes de travail peuvent également être constitués en fonction des besoins d'évolutions identifiés.

En outre, une commission d'agrément a pour mission de s'assurer que les laboratoires de mesures ont les compétences organisationnelles et techniques pour fournir au réseau des résultats de mesures de qualité. Elle émet un avis sur les demandes des laboratoires qui sollicitent l'agrément de l'ASN, et peut proposer l'agrément, le refus, le retrait ou la suspension d'agrément. L'ASN prend ensuite sa décision, qui est publiée à son *Bulletin officiel*.

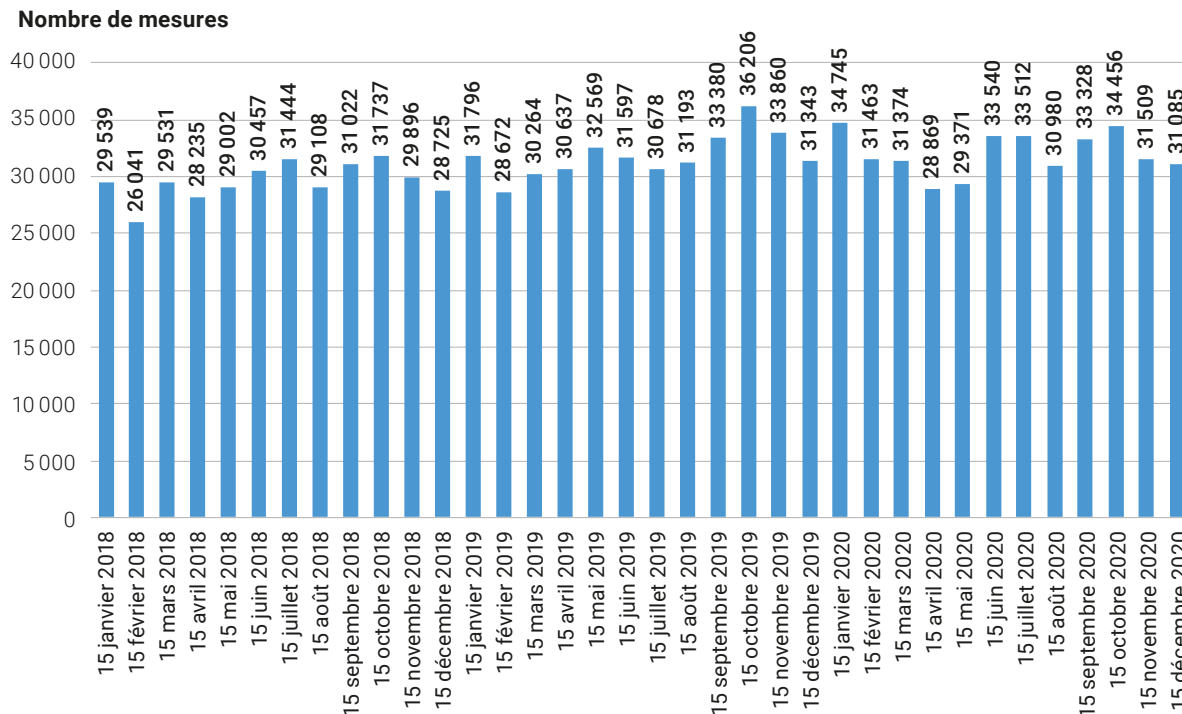
La transmission des résultats de mesures au RNM

La majorité des acteurs français contribuant à la surveillance radiologique de l'environnement, alimentent le RNM en y déversant leurs résultats de mesures.

Chaque contributeur envoie, par un mode de transfert sécurisé *via* internet, ses données formatées selon un protocole d'échange d'informations défini en commun. À ce jour, 65 producteurs de mesures de la radioactivité de l'environnement transmettent des données au réseau national. Environ 30 000 mesures alimentent chaque mois la base de données centrale du réseau depuis sa mise en service en janvier 2009.

La figure 13 présente le nombre de données qui ont été mensuellement envoyées au RNM sur la période 2018-2020.

FIGURE 13 / DONNÉES DÉVERSÉES AU RNM PAR LES PRODUCTEURS SUR LA PÉRIODE 2018-2020



L'exploitation et la restitution des informations du RNM

Les données centralisées dans le système d'information du RNM sont restituées au public sous forme cartographique sur le site www.mesure-radioactivite.fr. Elles sont également analysées dans un bilan radiologique de l'état de l'environnement publié tous les trois ans. Ce rapport est le troisième du genre, les précédents ayant été publiés en 2015 (période juin 2011-décembre 2014) et 2018 (période janvier 2015-décembre 2017).

Pour les internautes non spécialistes du domaine, quinze couples matrice/radionucléide dits « témoins », présélectionnés pour leur représentativité, bénéficient d'une analyse particulière. L'utilisateur peut également consulter les mesures réalisées autour de lui (géolocalisation) (figure 14).

FIGURE 14 / TÉMOINS DU RNM FACILITANT L'ACCÈS ET LA COMPRÉHENSION DES DONNÉES



L'agrément des laboratoires

Les agréments des laboratoires pour les mesures de la radioactivité de l'environnement au titre de l'article R.1333-26 du Code de la santé publique sont délivrés par décision de l'ASN pour une durée de 5 ans.

Pour être agréés, les laboratoires sont tenus de :

- présenter à l'ASN un dossier de demande d'agrément faisant état des agréments sollicités et justifiant de la conformité de leurs pratiques en matière de mesures et de prélèvements aux exigences de la norme NF EN ISO/IEC 17025 applicables aux laboratoires d'essais ;
- satisfaire aux essais de comparaison inter-laboratoires organisés périodiquement par l'IRSN.

Les agréments sont délivrés par décision de l'ASN, sur avis de la commission d'agrément des laboratoires, après examen des demandes d'agrément et au vu des résultats des laboratoires aux essais de comparaison inter-laboratoires (EIL) organisés par l'IRSN. Ils sont attribués pour une durée de validité maximale de cinq ans.

Depuis 2003, plus de soixante laboratoires dont un laboratoire étranger se sont engagés dans la démarche d'agrément pour les mesures de radioactivité de l'environnement.

Les laboratoires agréés dans le cadre du réseau sont :

- des laboratoires des exploitants nucléaires qui réalisent la surveillance de l'environnement des installations en application des dispositions réglementaires qui leur sont imposées ;
- des laboratoires d'organismes publics qui réalisent des mesures de contrôle de radioactivité à des fins de contrôle sanitaire ;
- des laboratoires universitaires qui peuvent effectuer des mesures de radioactivité pour le compte d'exploitants nucléaires ou de collectivités territoriales (contrôle sanitaire des eaux de consommation) ;
- des laboratoires privés qui réalisent notamment des contrôles radiologiques des eaux de consommation dans le cadre de contrats ;
- des laboratoires d'associations de protection de l'environnement qui réalisent des mesures indépendantes pour leur propre compte ou celui de collectivités territoriales ;
- des laboratoires étrangers, le plus souvent publics, travaillant dans des secteurs rattachés à la protection sanitaire des populations.

Situation des laboratoires agréés au 1^{er} janvier 2021

Au 1^{er} janvier 2021, le nombre de laboratoires agréés pour la mesure de la radioactivité de l'environnement est de 69, dont 41 laboratoires d'exploitants nucléaires, les autres se répartissant entre les secteurs public (19), privé (6) et associatif (3). Ces laboratoires disposent de 955 agréments (figure 15).

Depuis l'introduction, en 2015, d'agréments correspondant aux mesures des radionucléides émetteurs gamma dans les denrées alimentaires dans le cadre des contrôles sanitaires, 9 laboratoires départementaux du réseau de la DGAL et 3 laboratoires du Service commun des laboratoires (SCL) ont sollicité un agrément auprès de l'ASN afin d'insérer leurs mesures dans le RNM.

Les agréments en chiffres

La figure 16 ci-après détaille le nombre d'agréments délivrés aux laboratoires par matrice et par an depuis le 1^{er} janvier 2009, année de création du RNM.

Qu'est-ce qu'un essai de comparaison inter-laboratoires ?

Les essais de comparaison inter-laboratoires organisés par l'IRSN ont pour but d'éprouver la compétence technique des laboratoires. Il s'agit de tests d'aptitude consistant à comparer les résultats obtenus par les laboratoires sur des échantillons identiques à une valeur de référence.

Ces essais portent sur la mesure de radionucléides artificiels, ou encore des radionucléides des chaînes naturelles de l'uranium et du thorium. L'IRSN est chargé de la préparation des échantillons, de leur livraison aux laboratoires inscrits aux essais, de la détermination de la valeur de référence et du traitement statistique des résultats obtenus par les laboratoires.

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

Pour chaque essai, le nombre de participants peut atteindre 70 laboratoires, y compris quelques laboratoires étrangers.

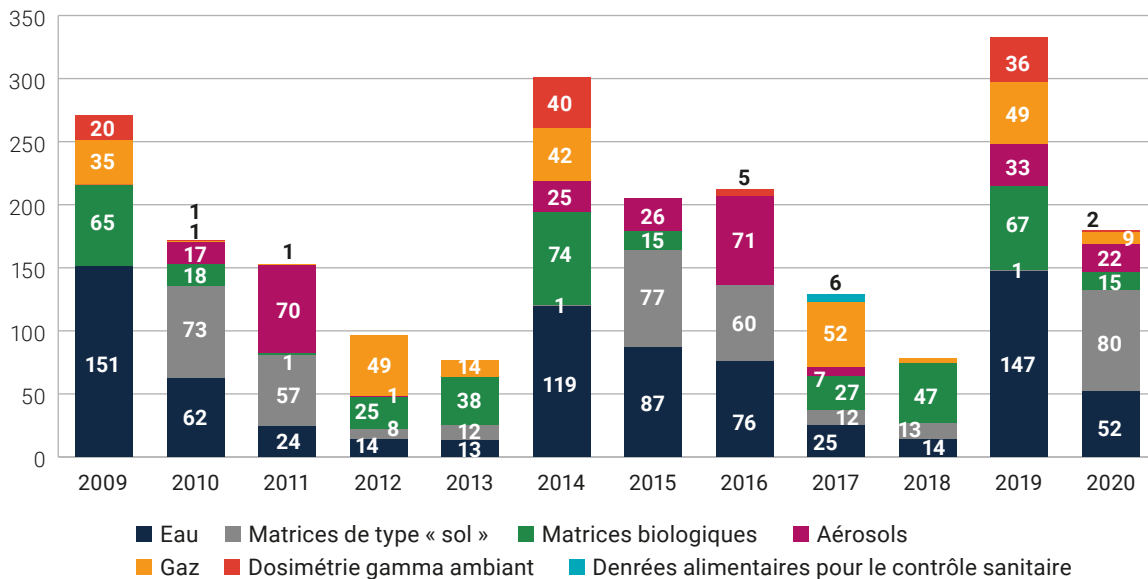
Ce type d'essai est organisé par l'IRSN depuis 40 ans avec actuellement un rythme annuel de 5 à 8 essais dans le cadre du RNM, soit un total de 74 essais de comparaison depuis 2009.

FIGURE 15 / AGRÉMENTS RNM EN VIGUEUR AU 1^{ER} JANVIER 2021



FIGURE 16 / AGRÉMENTS RNM DÉLIVRÉS PAR L'ASN DEPUIS 2009

Nombre d'agrément délivrés



La figure 17 présente le nombre d'EIL organisés annuellement depuis 2009.

Depuis 2006, le laboratoire de l'IRSN qui organise ces essais de comparaison inter-laboratoires est accrédité par le COFRAC (Comité français d'accréditation).

Les différents types d'essais proposés dans le cadre du RNM sont programmés par type de matrice environnementale et par catégorie de mesures radiologiques en fonction de la grille d'agrément des laboratoires définie en annexe de la décision homologuée de l'Autorité de sûreté nucléaire n° 2008-DC-0099 du 29 avril 2008 modifiée, relative à l'organisation du RNM et fixant les modalités d'agrément des laboratoires.

On distingue ainsi :

- 7 familles de matrices environnementales : les eaux, les sols, les matrices biologiques, les aérosols, les gaz, le milieu ambiant et les denrées ;
- 17 catégories de mesures radioactives.

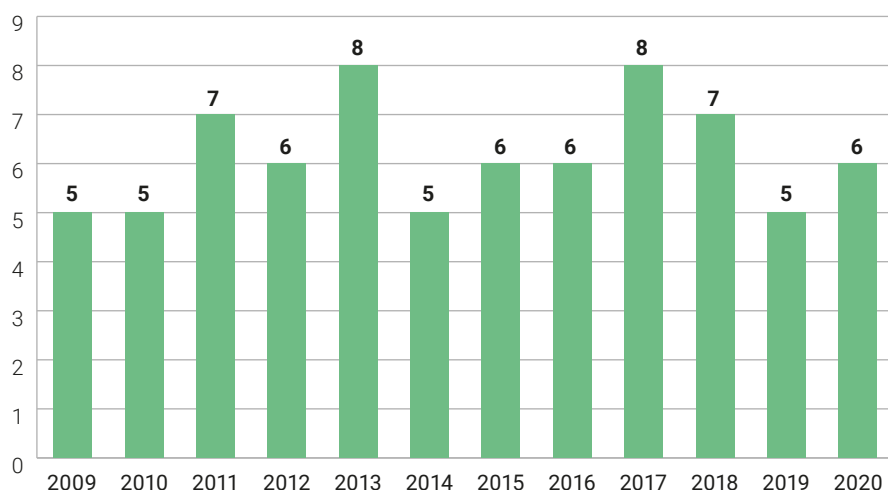
Les essais de comparaison interlaboratoires permettent aux laboratoires participants de démontrer la qualité des méthodes d'analyses mises en œuvre, de fournir aux organismes d'accréditation les éléments permettant de juger de la maîtrise des processus d'analyses et d'obtenir un agrément de l'ASN dans le cadre de la réglementation.

CILEI - Le site internet des comparaisons inter-laboratoires pour l'environnement de l'IRSN

Dans le cadre de l'organisation des essais inter-laboratoires pour la mesure de radioactivité de l'environnement et des denrées alimentaires, l'IRSN a développé un site internet dédié aux échanges d'informations entre les laboratoires participant à ces essais et l'IRSN : <https://cilei.irsnn.fr/>

FIGURE 17 / EIL ORGANISÉS PAR L'IRSN DEPUIS 2009

Nombre d'EIL organisés



FOCUS DU TERRAIN À LA PUBLICATION AU RNM : LE TRAITEMENT DE LA DONNÉE

Avant d'être rendues accessibles sur le site du RNM, les informations tirées de la mesure de la radioactivité dans l'environnement, qu'elles proviennent de mesures directes sur le terrain ou d'analyses en laboratoire d'échantillons prélevés

dans l'environnement, vont parcourir un cheminement complexe qui doit permettre de les enrichir sans dégrader leur intégrité. Les producteurs de données doivent ainsi mettre en œuvre des moyens numériques d'acquisition, de stockage, de conversion et de contrôle des données sur l'ensemble de cette chaîne qui s'étend du terrain jusqu'à la consultation.

Sur le terrain

L'acquisition de données de terrain constitue une étape clé durant laquelle l'opérateur doit relever l'ensemble des informations contextuelles qui encadrent la mesure ou le prélèvement. Parmi ces informations figurent notamment l'identification du prélèvement (nature) et sa position dans le temps et dans l'espace. Elles représentent autant de « clés » qui permettront de rechercher ou de représenter ultérieurement les résultats d'analyse ou de mesure dans les outils de restitution, notamment le site web du RNM. Un autre enjeu de la saisie de terrain est l'association de ces informations avec l'échantillon physique correspondant qui sera acheminé au laboratoire. La perte de ce lien entraîne très souvent le rejet du résultat de mesure.

FIGURE 1 / SAISIES SUR LE TERRAIN D'INFORMATIONS LIÉES À LA RÉALISATION DE PRÉLÈVEMENTS DE SALADES ET DE PLANTES AQUATIQUES



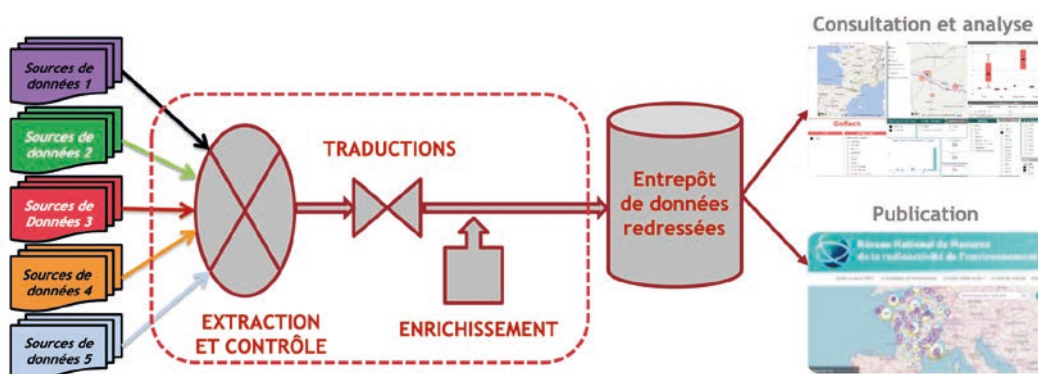
En laboratoire

Pour acquérir et enrichir les données liées aux analyses radiologiques d'échantillons, la plupart des laboratoires des producteurs disposent d'un LIMS (*Laboratory Information Management System* ou système de gestion de l'information du laboratoire). Outil informatique, il doit combiner plusieurs contraintes fonctionnelles : robustesse, souplesse d'utilisation pour permettre à la fois la gestion de prélèvements et analyses programmés et celle d'enregistrements libres, simplicité et ergonomie, compatibilité avec les systèmes amont (terrain) et aval (capitalisation, publication des données au RNM par exemple). Véritable fil d'Ariane de l'information entre la réception d'un échantillon et la validation des résultats d'analyses réalisées sur cet échantillon, le LIMS nécessite souvent un coûteux maintien en conditions opérationnelles imposé par la garantie d'un taux de disponibilité important tout en faisant face à l'obsolescence rapide de ses composants.

La capitalisation des données

Les pratiques et les systèmes (dont les LIMS) évoluant régulièrement, la capitalisation des informations numériques dans le temps est un enjeu important pour la plupart des entités en charge de la surveillance de l'environnement. Les données numériques représentent un patrimoine important qu'il convient de sauvegarder pour mieux l'exploiter. Le présent bilan radiologique illustre très bien cet aspect en présentant nombre de chroniques temporelles. Pour sauver et préserver ce patrimoine, les acteurs de la surveillance peuvent mettre en place un système d'entrepôt de données alimenté par différentes sources (plusieurs LIMS par exemple). Une branche de modélisation spécifique est alors développée et mise en place avec des règles de transformation (traduction selon des référentiels communs, enrichissement) et de contrôle, garants de la qualité et de l'unicité des données une fois propagées dans l'entrepôt.

FIGURE 2 / SCHÉMA RELATIONNEL D'UN SYSTÈME DE CAPITALISATION DE DONNÉES ISSUES DE DIFFÉRENTES SOURCES



Dans cet exemple, l'entrepôt des données unifiées est branché sur des outils de visualisation facilitant l'appropriation et l'analyse de celles-ci. Les publications des données au RNM ou sur d'autres cibles (site de la commission européenne par exemple : <https://remon.jrc.ec.europa.eu>), sont réalisées également à partir de cet entrepôt.

La publication des données au RNM

Pour remplir son rôle de centralisation et de restitution de l'ensemble des données françaises de surveillance environnementale, le système de gestion du RNM doit garantir la qualité, l'intégrité et la compatibilité de ces données. Il impose ainsi un format de déclaration qui doit être respecté par l'ensemble des producteurs de données, ainsi qu'un langage commun fondé sur un dictionnaire de tables de référence. Chaque acteur de la surveillance envoie sans délai, par un mode de transfert sécurisé par internet, ses données formatées selon le protocole d'échange d'information défini en commun. À chaque jeu de données publié, des contrôles permettent de vérifier que les données ont été acquises par un laboratoire agréé et que celles-ci respectent le formalisme et le contenu métier attendus. En moyenne, 30 000 résultats de mesure sont transmis chaque mois et intègrent la base de données centrale du RNM. Ils sont rendus accessibles à tout le monde via l'interface web du RNM selon des modes de consultation adaptés aux différents publics visés (cf. focus de la page 37 de l'édition précédente du *Bilan radiologique 2015-2017*) :

- un mode « guidé » dans lequel les données sont accompagnées de repères graphiques et d'éléments de contextualisation pour faciliter leur interprétation et leur compréhension ;
- un mode « avancé » sur la base d'un formulaire de recherche permettant de moduler la carte de consultation.

FOCUS ANALYSE STATISTIQUE DE SCRUTATION DE DONNÉES

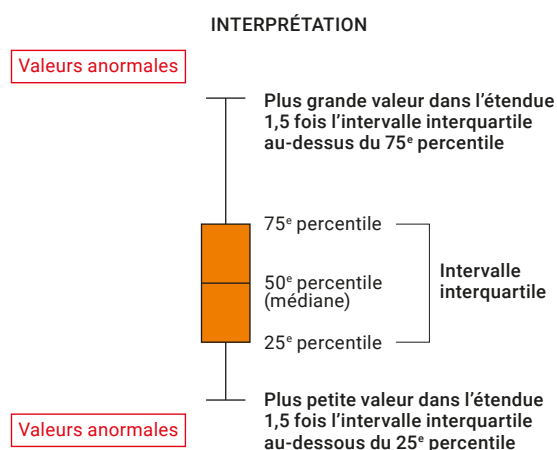
Afin d'améliorer la qualité de son patrimoine de données relatives à la radioactivité de l'environnement, l'IRSN développe et met en œuvre des outils d'analyse statistique de scrutation visant à identifier l'éventuelle présence d'anomalies (données aberrantes ou « *outliers* »).

La détection d'anomalies est en enjeu ancien et majeur des applications industrielles de la statistique. Parmi les exemples d'applications courantes, on trouve notamment les transactions bancaires (où une anomalie sera vue comme une fraude potentielle), la surveillance des données physiologiques d'un malade (l'anomalie est un problème de santé possible), ou encore la détection de défauts dans des chaînes de production. Le but des méthodes élaborées est de repérer des données qui ne sont pas conformes à ce à quoi on peut s'attendre par rapport aux autres données : des données dites « anormales » qui ne suivent pas le même schéma ou qui sont atypiques pour la distribution de probabilité observée.

Dans le cas des données relatives à la radioactivité de l'environnement, peuvent être considérées comme « anomalies » des valeurs de mesures d'activité qui se démarquent du bruit de fond environnemental et/ou des activités relevées historiquement. Les valeurs aberrantes peuvent influencer fortement la valeur des indicateurs statistiques utilisés tels que la moyenne calculée pour estimer les doses. Leur présence peut fausser la compréhension du jeu de données et amener à émettre des conclusions erronées. Il est essentiel de les identifier puis de les corriger ou de les expliquer.

Le premier protocole de détection d'anomalies mis en œuvre est basé sur la méthode dite de « Tukey », une des méthodes statistiques de scrutation à une seule dimension parmi les plus classiques.

FIGURE 1 / ILLUSTRATION DE LA MÉTHODE DE TUKEY



Selon cette méthode, les données sont considérées comme « anormales » lorsque leur valeur dépasse un seuil calculé à partir des quartiles de la distribution des mesures.



Généralement, dans la littérature, ce seuil est égal à :

$$\text{Seuil} = q_{75} + \text{facteur multiplicatif} \times \text{IQR}$$

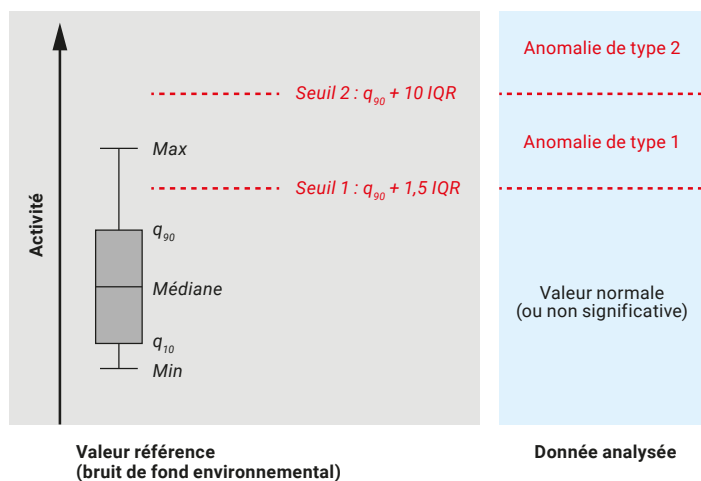
Où :

- q_{75} est le troisième quartile de la distribution des mesures, ce qui équivaut à la valeur pour laquelle 75 % des données sont inférieures à cette valeur ;
- IQR est l'intervalle interquartile, c'est-à-dire la différence entre le troisième et le premier quartile ;
- le facteur multiplicatif est un coefficient communément égal à 1,5, 3 ou 10 selon la sévérité des anomalies à détecter. Son choix résulte d'une analyse de sensibilité qui a été menée au préalable.

Pour l'application à la radioactivité dans l'environnement, la méthode Tukey a été adaptée comme suit :

- pour une approche plus prudente, c'est le q_{90} (90 % des données sont inférieures à cette valeur) qui a été choisi à la place du q_{75} proposé par la méthode de Tukey. ;
 - l'analyse est effectuée de façon distincte pour chaque couple radionucléide/matrice ;
 - les mesures utilisées afin d'établir les seuils sont des valeurs de référence associées au bruit de fond environnemental indiquées dans le chapitre 2 de ce rapport ;
 - deux seuils ont été retenus pour des facteurs multiplicatifs égaux à 1,5 et à 10.
- Le seuil 1 permet de détecter les anomalies de type 1, associées à un faible écart au bruit de fond. Le seuil 2 permet de détecter les anomalies de type 2, associées à des écarts significatifs au bruit de fond : elles sont à analyser en priorité.

FIGURE 2 / ILLUSTRATION DU PROTOCOLE MIS EN ŒUVRE



Les causes des anomalies détectées par ces outils de scrutation peuvent être multiples :

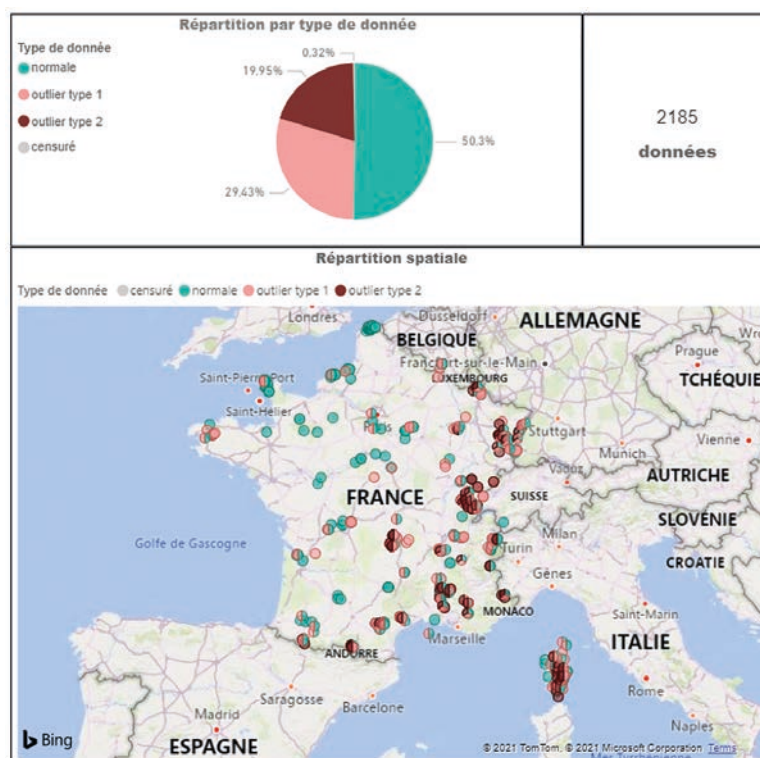
- marquage connu (pollution historique, rejet chronique...);
- problème lié à la qualité de la donnée saisie dans la base de données (mauvaise unité, erreur de classification, facteurs de conversion manquants ou erronés...);
- marquage à investiguer (augmentation brusque, détection de radionucléide inhabituel...).





À titre d'illustration, la figure 3 présente le résultat de la scrutation statistique de détection d'anomalies pour les mesures d'activités en ^{137}Cs dans les sols non cultivés, acquises entre 2000 et 2018. L'évaluation met en évidence la présence d'anomalies de type 2 liées majoritairement aux zones de rémanence élevées des retombées atmosphériques de l'accident de Tchernobyl (cf. focus pp. 69-71 « Variabilité spatiale du bruit de fond du césium-137 en France »).

FIGURE 3 / EXEMPLE DE RÉSULTAT DE SCRUTATION D'ANOMALIES POUR LE ^{137}Cs DANS LES SOLS NON CULTIVÉS



Plus généralement, l'analyse réalisée a mis en évidence que les données scrutées (données issues de la surveillance régulière de l'IRSN pour la période 2010-2020) sont de bonne qualité : à l'exception d'anomalies liées à des coordonnées spatiales erronées, aucun problème de saisie, d'unité ou problème de contrôle de la donnée n'a été identifié. Par ailleurs, la majorité des anomalies détectées liées à des marquages significatifs ont fait ou font l'objet d'une investigation ou d'une surveillance adaptée.

La mise en œuvre de méthodes statistiques de scrutation de données s'inscrit dans la stratégie d'analyse des données environnementales promue par l'IRSN. Des travaux se poursuivent afin de définir de nouveaux algorithmes permettant d'identifier les anomalies d'évolution temporelle (décrochages notamment) ou d'intégrer la dimension spatiale à l'analyse afin d'identifier des valeurs anormales par rapport à leur contexte géographique. Enfin, il est prévu que la méthodologie de scrutation de données présentée soit également mise en œuvre afin d'analyser les données présentes dans la base de données du RNM.

1.5. MODALITÉS DE PRÉSENTATION ET D'EXPLOITATION DES RÉSULTATS DE MESURE DANS LE BILAN RADIOLOGIQUE 2018-2020

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 2020 et couvrant la période de janvier 2018 à décembre 2020. 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 4 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 (cf. chapitre 2). 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 9 d'annexes.

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 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 9 d'annexes.

TABLEAU 4 / 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 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 (cf. chapitre 2), auxquels est exposé le détecteur, ainsi qu'à un bruitage intrinsèque au dispositif même. Ce « bruit de fond métrologique » est fluctuant. Aussi, lorsque l'activité de l'échantillon est très faible, il est difficile de distinguer le rayonnement ajouté issu de l'échantillon, de la fluctuation du bruit de fond métrologique. Dans certains cas, le métrologiste « décide » que le résultat de la mesure de l'activité de l'échantillon n'est pas significatif (que l'activité mesurée ne peut pas être clairement attribuable à l'échantillon). Le métrologiste déclare alors l'activité de l'échantillon « inférieure au seuil de décision » : $< SD$. Le seuil de décision est donc la valeur minimale que doit avoir la mesure d'un échantillon pour que le métrologiste puisse décider de la présence d'une activité. À noter que la valeur de ce seuil de décision

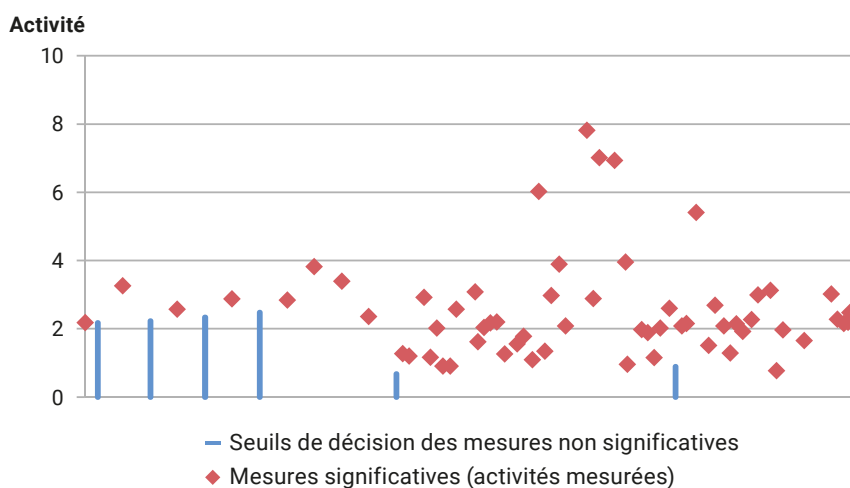
ne dépend que du dispositif de mesure (du bruit de fond métrologique) et non de l'activité de l'échantillon.

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 9.1 p. 382.

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 18).

Le sigle « nm » dans les tableaux indique un paramètre ou un radionucléide non mesuré.

FIGURE 18 / 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 météorologique, il n'existe pas de mesure exacte d'une activité. Le résultat d'analyse est toujours assorti d'une incertitude météorologique fournie par le métrologue. Cette incertitude météorologique 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 métrologue 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

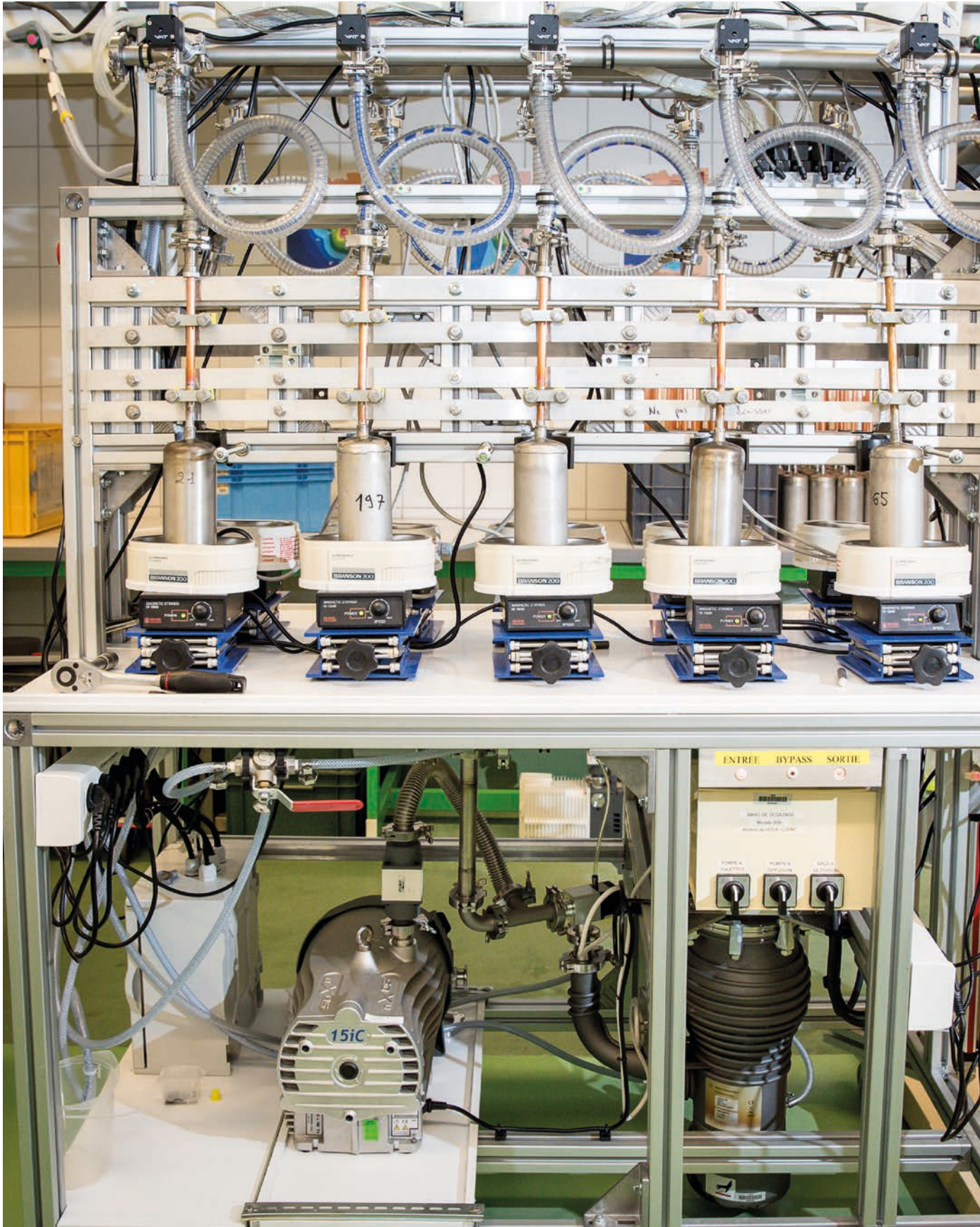
L'indicateur statistique choisi pour le présent bilan est une moyenne arithmétique, calculée à partir d'une part, des résultats d'analyse significatifs ($> SD$) et d'autre part, des résultats d'analyse non significatifs ($< SD$) auxquels est affectée la valeur du SD lorsque certaines conditions sont remplies. Les raisons du choix de cet indicateur, la méthode utilisée et les différents cas possibles sont présentés dans le chapitre 9 d'annexes.

Dans le chapitre 2, 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 9 d'annexes.



Station « AS1 » équipées de différents dispositifs de prélèvements et de mesure pour la surveillance de l'environnement, située à 1 km sous les vents dominants du CNPE de Saint-Albans-Saint-Maurice.

Banc de dégazage de l'hélium-3 pour la mesure du tritium à très bas niveau





02

LE « BRUIT DE FOND » RADIOLOGIQUE FRANÇAIS

2.1. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE NATUREL	44
Le rayonnement cosmique et les radionucléides cosmogéniques dans l'environnement	44
Les radionucléides telluriques dans l'environnement	46
2.2. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE RÉMANENT DES RETOMBÉES ANCIENNES	55
Retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires	55
Retombées de l'accident de Tchernobyl	67
Retombées de l'accident de Fukushima	72
2.3. GAMMES D'ACTIVITÉS MASSIQUES ET VOLUMIQUES DU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	72
2.4. GAMME DES DOSES À LA POPULATION, LIÉES AU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	84
Doses efficaces externes liées aux rayonnements cosmique et tellurique	84
Doses efficaces par ingestion de radionucléides naturels <i>via</i> l'alimentation et le tabagisme	84
Dose efficace liée à l'inhalation de radon	86
Doses efficaces liées à la rémanence des retombées anciennes de radionucléides artificiels	87
Bilan des doses efficaces liées au bruit de fond radiologique français	87

02

LE « BRUIT DE FOND » RADIOLOGIQUE FRANÇAIS

On désigne par « bruit de fond » radiologique, les activités des différents radionucléides présents dans l'environnement, en dehors de toute influence anthropique actuelle (industrie nucléaire, autres industries, rejets hospitaliers...). Ce bruit de fond résulte d'une part de sources naturelles, et d'autre part de la rémanence d'apports anciens de radionucléides artificiels qui ont concerné l'ensemble du territoire ; il s'agit notamment des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et des retombées de l'accident de Tchernobyl. Ce bruit de fond contribue aux expositions radiologiques auxquelles est soumise la population. Ce chapitre décrit le bruit de fond naturel (2.1), le bruit de fond d'origine artificielle (2.2), puis donne des éléments relatifs à l'exposition radiologique de la population qu'il engendre (2.3).

2.1. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE NATUREL

Le bruit de fond radiologique naturel a deux origines : les radionucléides telluriques présents sur terre depuis sa formation et le rayonnement cosmique qui produit de manière permanente des radionucléides cosmogéniques.

Le rayonnement cosmique et les radionucléides cosmogéniques dans l'environnement

Le rayonnement cosmique provient du soleil et de l'espace (autres soleils et galaxies). Il est composé essentiellement de protons. Ces protons interagissent avec les atomes de la haute atmosphère ce qui engendre, d'une part un rayonnement cosmique « secondaire » composé d'électrons, de protons, de photons, de neutrons..., et d'autre part la production de radionucléides « cosmogéniques » comme le tritium (^3H), le carbone-14 (^{14}C), le béryllium-7 (^7Be) et le sodium-22 (^{22}Na) notamment.

Variabilité du rayonnement cosmique

Le rayonnement cosmique est atténué par l'épaisseur de l'atmosphère qui lui fait écran. Il en résulte que le débit de dose qu'il engendre augmente avec l'altitude. C'est ce que montrent les figures 1 et 2.

Le rayonnement cosmique varie également mais dans une moindre mesure avec la latitude. En effet, certaines particules sont déviées par le champ magnétique terrestre augmentant le rayonnement cosmique au niveau des pôles par rapport à l'équateur. À l'échelle de la France métropolitaine, l'effet de la latitude est secondaire et n'est pas pris en compte dans les évaluations qui suivent.

Le tritium cosmogénique

Le tritium (^3H) est l'isotope radioactif de l'hydrogène. Sa production naturelle se fait par interaction du rayonnement cosmique avec les atomes d'azote, d'oxygène et d'argon présents dans la haute atmosphère. L'hydrogène étant un constituant de l'eau et de la matière organique, il en est de même du tritium désigné par HTO s'il est sous forme d'eau et par TOL (pour Tritium Organiquement Lié) s'il est intégré à la matière organique.

L'activité en tritium est souvent exprimée en Bq/L, qu'il s'agisse d'eau libre d'un cours d'eau, de vapeur d'eau dans l'air, d'eau extraite par séchage de la matière organique ou encore d'eau extraite par combustion d'un échantillon. L'activité en tritium d'origine naturelle est de l'ordre de 0,1 à 0,6 Bq/L, ce qui correspond à des activités de l'ordre de 0,001 à 0,006 Bq/m³ d'air et de 0,1 à 0,6 Bq/kg frais dans les végétaux et les animaux.

Les activités en tritium mesurées actuellement dans l'environnement sont toujours supérieures à ces valeurs. En effet, à ce tritium naturel s'ajoute la rémanence du tritium apporté par les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires dans l'hémisphère nord de 1945 à 1980, mais principalement entre 1953 et 1963 (cf. chapitre 2.2 relatif aux retombées des essais nucléaires).

FIGURE 1 / CARTE DU DÉBIT DE DOSE DANS L'AIR INDUIT PAR LE RAYONNEMENT COSMIQUE ($\mu\text{Sv/h}$)

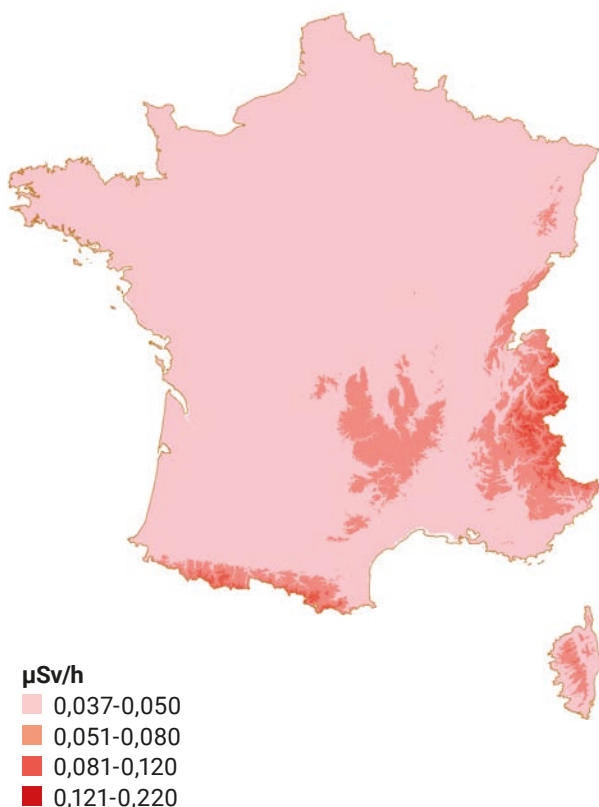
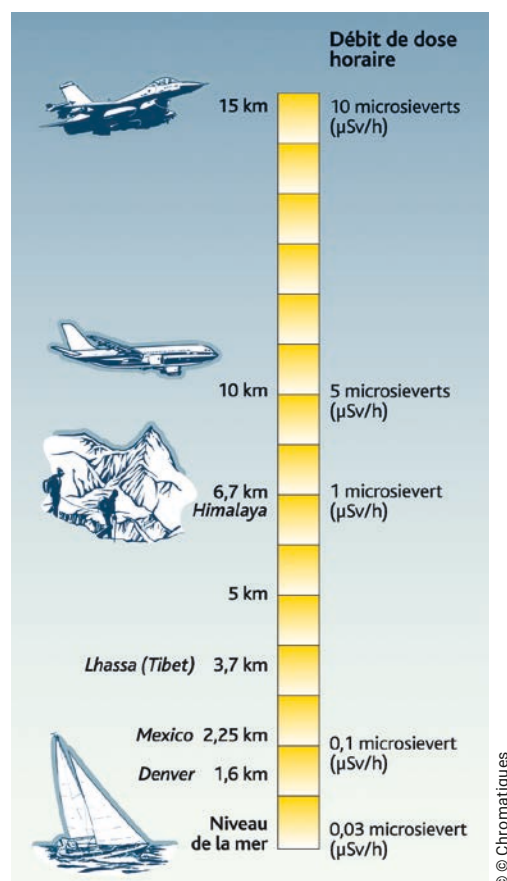


FIGURE 2 / ÉVOLUTION DU DÉBIT DE DOSE AVEC L'ALTITUDE ($\mu\text{Sv/h}$)



Le carbone-14 cosmogénique

Le carbone-14 est naturellement produit par interaction du rayonnement cosmique avec les atomes d'azote de la haute atmosphère. Comme le carbone stable, le carbone-14 devient alors un constituant de la matière organique. Présent dans l'air principalement sous forme de CO_2 , il s'incorpore aux végétaux lors de la photosynthèse puis est transféré aux animaux par ingestion. La production de carbone-14 cosmogénique se traduit par une activité de ce radionucléide par unité de masse de carbone stable qui était voisine de 226 Bq/kg de carbone stable dans l'air et dans toutes les composantes de l'environnement terrestre avant le début des essais nucléaires (1945).

Comme pour le tritium, de grandes quantités de carbone-14 ont été produites lors des essais atmosphériques d'armes nucléaires dans l'hémisphère nord. Ce qui se traduit par des activités mesurées dans l'environnement qui sont aujourd'hui encore légèrement supérieures à cette valeur (cf. chapitre 2.2 relatif aux retombées des essais nucléaires).

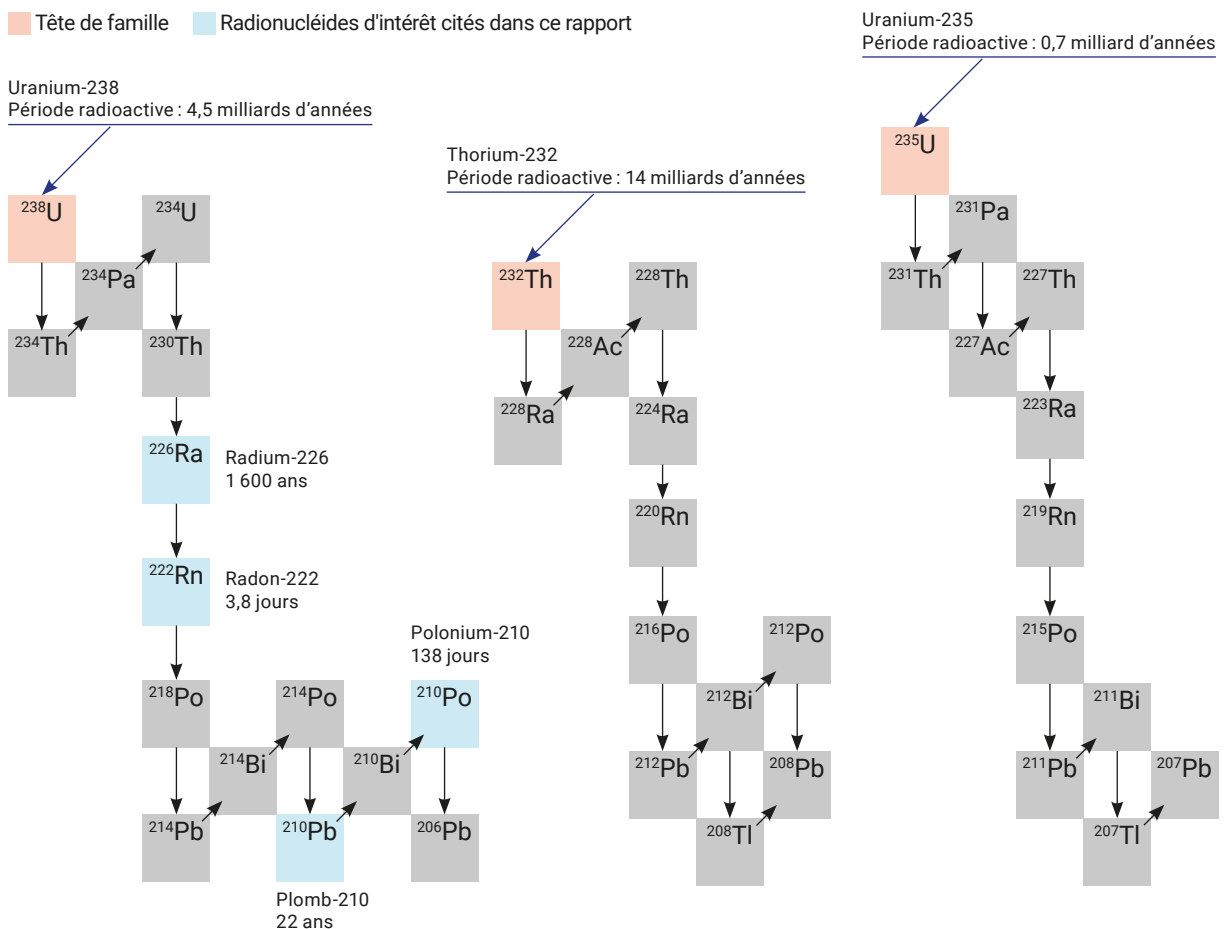
Les radionucléides telluriques dans l'environnement

Les radionucléides telluriques sont présents sur terre depuis sa formation. Il s'agit principalement du potassium-40 (^{40}K), et des produits des chaînes de désintégration de l'uranium-238 (^{238}U), de l'uranium-235 (^{235}U) et du thorium-232 (^{232}Th). Présents dans l'écorce terrestre, ces quatre radionucléides persistent encore aujourd'hui en raison de leur très longue période radioactive (de l'ordre de plusieurs milliards d'années). L'uranium-238, le thorium-232 et l'uranium-235 produisent par désintégrations successives 36 radionucléides (figure 3). Au total c'est donc une quarantaine de radionucléides telluriques qui sont présents dans toutes les composantes de l'environnement : les sols, l'air, les eaux, la flore et la faune, dont l'Homme.

Le potassium-40

Le potassium est un élément très répandu sur Terre où il est contenu dans de nombreux minéraux. Même si le potassium-40 ne représente que 0,0117 % de la masse du potassium, ce radionucléide est le plus abondant dans l'environnement avec des activités de plusieurs centaines de Bq/kg sec dans les sols et les sédiments continentaux et marins (figure 14). Élément majeur pour les organismes vivants, le potassium (dont le ^{40}K) est fortement transféré aux végétaux et animaux, ce qui explique les activités de l'ordre de la centaine de Bq/kg frais dans les denrées (figure 15). Ces activités sont de loin les plus importantes de tous les radionucléides naturels et artificiels présents dans l'environnement, en dehors de toute influence anthropique locale.

FIGURE 3 / CHAÎNES DE DÉSINTÉGRATION DE L'URANIUM-238, DU THORIUM-232 ET DE L'URANIUM-235



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

Dans les roches non altérées, tous les radionucléides des chaînes de l'uranium et du thorium présentent des activités sensiblement égales à celles de leur tête de chaîne respective (^{238}U , ^{235}U ou ^{232}Th) : on dit qu'ils sont en équilibre. Par exemple l'activité en radium-226 d'une roche est égale à celle de l'uranium-238. Ce n'est pas le cas dans l'eau ni dans les organismes vivants : ces éléments ont des propriétés physico-chimiques différentes qui induisent des comportements et transferts différents. Dans les sols, l'équilibre des radionucléides telluriques est généralement observé jusqu'au radium bien que de légers déséquilibres puissent être liés à l'action des organismes vivants ou au lessivage des sols. Cet équilibre n'est toutefois plus observé après les isotopes du radium. En effet, en se désintégrant, le radium produit un gaz radioactif, le radon (^{222}Rn principalement) qui s'échappe du sol vers l'atmosphère, rompant l'équilibre pour la fin de la chaîne de désintégration. En se désintégrant, le radon produit des radionucléides qui se fixent aux particules en suspension dans l'air. Parmi ces radionucléides, le polonium-210 (^{210}Po) et le plomb-210 (^{210}Pb) se déposent à la surface du sol. Ce dépôt se traduit notamment par des activités des sols en surface légèrement plus élevées en ^{210}Pb qu'en uranium-238 ou en radium-226.

En France à un endroit donné, les activités des roches et sols en uranium-238 et en thorium-232 sont du même ordre ; en revanche, celles de l'uranium-235 sont 20 fois plus faibles. Un rapport d'activité entre l'uranium-238 et l'uranium-235 inférieur à 20 traduit un enrichissement en uranium-235 (uranium enrichi) ; un rapport d'activité plus élevé correspond à de l'uranium appauvri. Par ailleurs, il faut signaler que l'uranium-236 (autre isotope de l'uranium) n'est mesurable dans l'environnement que sous l'influence de certaines installations ; sa présence atteste donc indubitablement d'une origine industrielle.

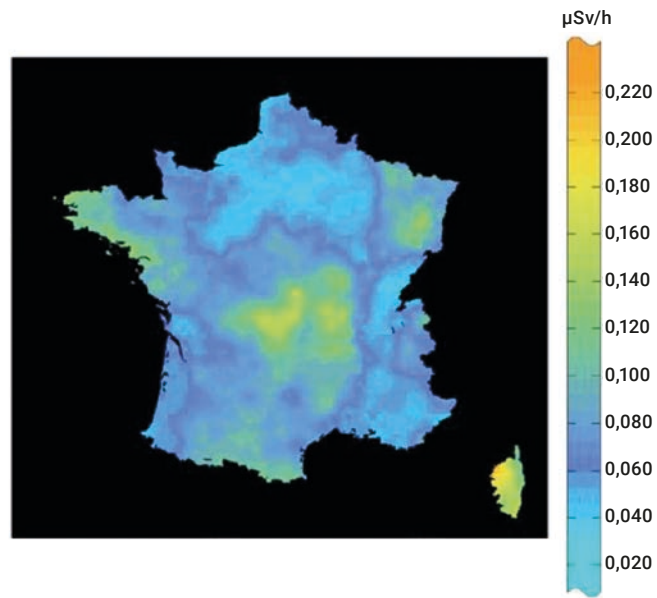
Variabilité de la teneur en uranium et thorium des sols et variabilité du débit de dose lié au rayonnement tellurique

Les activités en uranium et en thorium des principales composantes de l'environnement terrestre : air, végétaux, animaux, eaux de surface et sédiments, ainsi que les eaux souterraines, sont liées à celles des sols et à celles des formations géologiques sous-jacentes.

Si la moyenne des analyses effectuées par l'IRSN toutes régions, sites et type de sol confondus est de 40 Bq/kg sec pour l'uranium-238 comme pour le thorium-232, leurs activités varient de manière importante entre quelques Bq/kg sec et quelques centaines de Bq/kg sec suivant la nature du sous-sol. De manière générale, les roches des bassins sédimentaires (bassin parisien, bassin aquitain) et des formations calcaires sont plus pauvres en uranium que celles des massifs anciens (Massif armoricain, Massif central, Vosges). Ces activités peuvent atteindre le millier de Bq/kg sec dans des sols uranifères. Cette variabilité de la teneur des sols en descendants de l'uranium et du thorium peut être montrée au travers de celle du rayonnement (débit de dose dans l'air) qu'ils engendrent.

La figure 4 présente la carte du débit de dose gamma d'origine tellurique à l'échelle de la France métropolitaine. Cette carte a été établie à partir de mesures provenant de dosimètres témoins (c'est-à-dire placés hors d'influence de tout appareil de radiographie) placés dans 17 404 établissements dentaires et vétérinaires répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain. Les principales zones présentant les débits de dose les plus élevés sont le Massif central, le Massif armoricain, les Vosges et la Corse. Ces différentes régions sont toutes constituées de formations géologiques relativement riches en uranium (massifs granitiques). Cette carte est à rapprocher de celle de la figure 6 qui met en exergue ces formations géologiques comme étant également à l'origine des plus forts potentiels d'émission de radon dans l'air.

FIGURE 4 / CARTE DES DÉBITS DE DOSE GAMMA TELLURIQUE ÉTABLIE À PARTIR DE DOSIMÈTRES TÉMOINS



48



© © IRSN

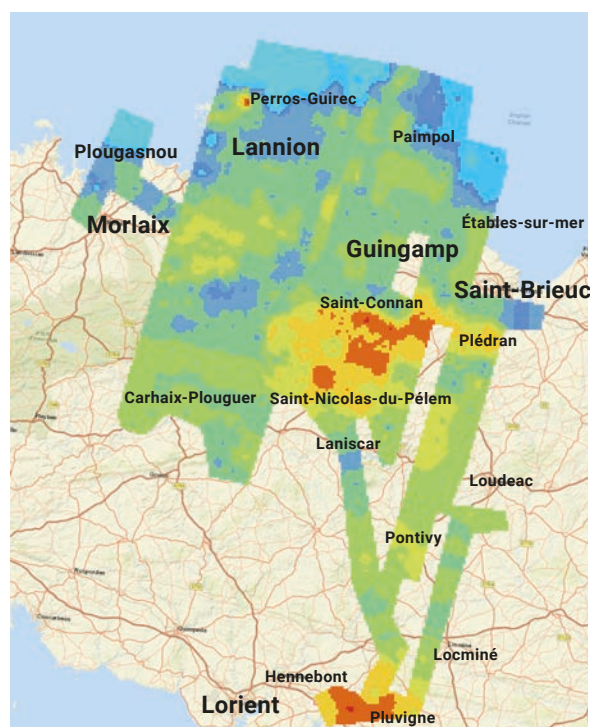
Dispositif de spectrométrie gamma embarqué Ulysse de l'IRSN ; les détecteurs sont dans les nacelles de chaque côté de l'hélicoptère. C'est ce dispositif, mais embarqué dans un avion, qui a permis l'obtention de la carte de la figure 5A.

La variabilité des teneurs en uranium et thorium des sols, et la variabilité du débit de dose dans l'air qu'elle engendre sont également bien visibles à l'échelle régionale. Ainsi, la figure 5A présente les variations du débit de dose à l'échelle de la partie nord de la Bretagne. Cette carte a été établie directement à partir de mesures aériennes du débit de dose gamma. La mise en perspective de la teneur en uranium des sols (figure 5B) montre une forte corrélation : les zones à plus fortes teneurs en uranium, en bleu-vert et bleu foncé, coïncident avec les plus forts débits de dose (en jaune-orange/rouge).

Par ailleurs, des variations locales peuvent être observées sur seulement quelques kilomètres. Au sud de Guingamp ou au nord de Lannion, le débit de dose passe ainsi de moins de 0,050 à plus de 0,100 $\mu\text{Sv/h}$. De telles variations du débit de dose liées aux teneurs en uranium-thorium des sols sont également observables à l'échelle micro-locale, avec des débits de dose qui peuvent passer du simple au double, voire plus, en quelques centaines de mètres.

Enfin, une variabilité très locale, à l'échelle métrique, peut être observée en des points particuliers du territoire (cf. focus p. 50).

FIGURE 5A / CARTE DU DÉBIT DE DOSE À 1 M AU-DESSUS DU SOL MESURÉ PAR SURVOL AÉRIEN D'UNE PARTIE DE LA BRETAGNE

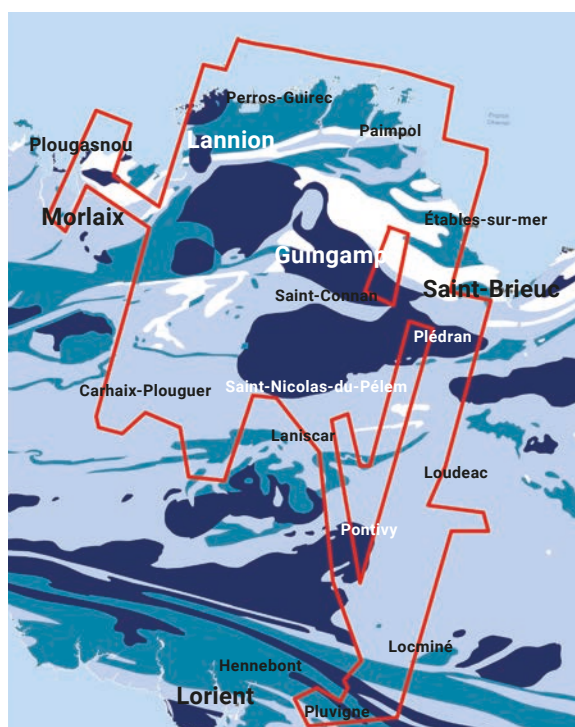


$\mu\text{Sv/h}$

0,100
0,094
0,088
0,082
0,076
0,070
0,064
0,058
0,052
0,046
0,040

Carte du débit d'équivalent de dose gamma acquise en 2013, au moyen du système de mesure radiologique aéroporté ULYSSE de l'IRSN lors d'un exercice en collaboration avec la Sécurité civile.

FIGURE 5B / CARTE DES TENEURS MOYENNES EN URANIUM DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES DANS LE NORD DE LA BRETAGNE



Gamme de teneur moyenne en U

< 2 ppm
2 - 5 ppm
5 - 8 ppm
> 8 ppm

Carte des teneurs moyennes en uranium des formations géologiques dans le nord de la Bretagne.

FOCUS VARIABILITÉ NATURELLE DU DÉBIT DE DOSE GAMMA À COURTE DISTANCE

Parmi les radionucléides telluriques présents dans l'écorce terrestre, les produits des chaînes de désintégration de l'uranium-238 et de l'uranium-235 peuvent être responsables d'un bruit de fond radiologique supérieur à la moyenne

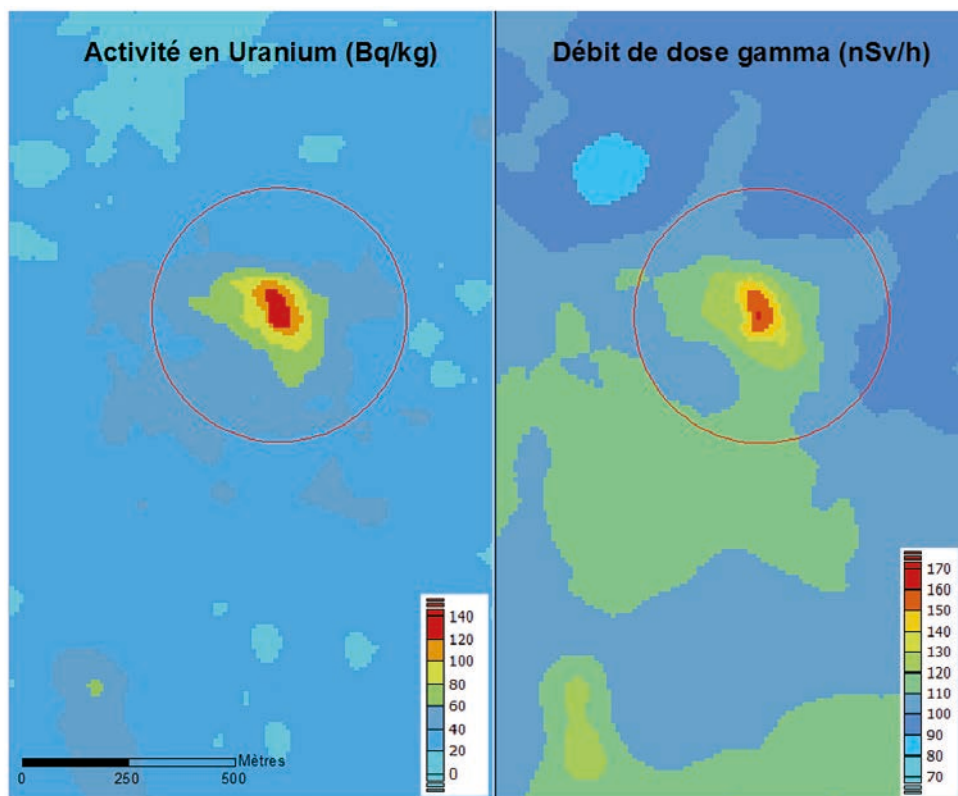
nationale. C'est souvent le cas dans les zones granitiques, notamment dans le massif central qui regroupe un grand nombre d'anciens sites miniers et zones de prospection minières.

Ainsi, un site naturel, localisé dans la Creuse et présentant des singularités en uranium, a été le terrain d'une intercomparaison de mesures de la radioactivité dans l'environnement réalisée par l'IRSN en juillet 2019. Vingt-cinq dispositifs de mesure *in situ* ont été déployés pour l'exercice, et des prélèvements de sol ont été réalisés pour des analyses en laboratoire de leur teneur en uranium.



L'exploitation des données de la campagne de mesures aéroportées (dispositif de mesure de spectrométrie gamma embarqué dans un hélicoptère) montre que des activités d'uranium dans les sols, localement plus importantes, sont à l'origine d'une augmentation du débit d'équivalent de dose gamma, sur une surface de l'ordre d'un hectare (cartes en figure 1).

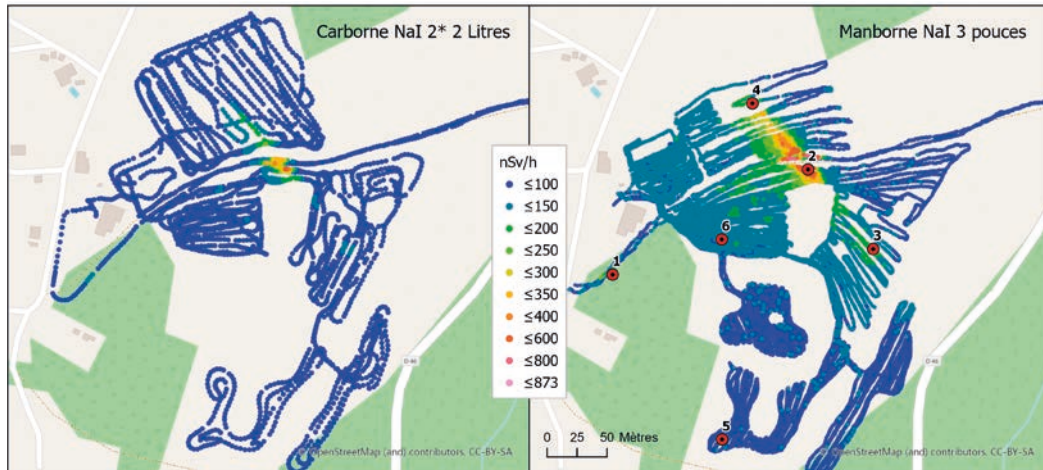
FIGURE 1 / MESURES AÉROPORTÉES ; COMPARAISON DE LA RÉPARTITION SPATIALE DE L'ACTIVITÉ DE L'URANIUM NATUREL AVEC CELLE DU DÉBIT DE DOSE GAMMA



En se focalisant sur la zone concernée, le déploiement de plusieurs dispositifs de mesure au sol a permis de délimiter plus finement ses contours et ses hétérogénéités. L'étude a également permis de quantifier les écarts de mesure entre les différents détecteurs et selon leur vecteur (piéton, véhicule terrestre ou aérien). Ces écarts sont particulièrement visibles sur les zones présentant les activités d'uranium où les débits d'équivalent de dose sont les plus élevés, les valeurs variant à très courte distance (un facteur 12 en quelques dizaines de mètres). La figure 2 compare les résultats de mesure de débit de dose de deux dispositifs mobiles, un système embarqué dans un véhicule avec deux détecteurs de gros volume (2 x 2 litres) et un champ de vision plus grand (durée de la campagne 2 h) et un système piéton plus léger (volume de 3 pouces, un jour et demi de mesures).

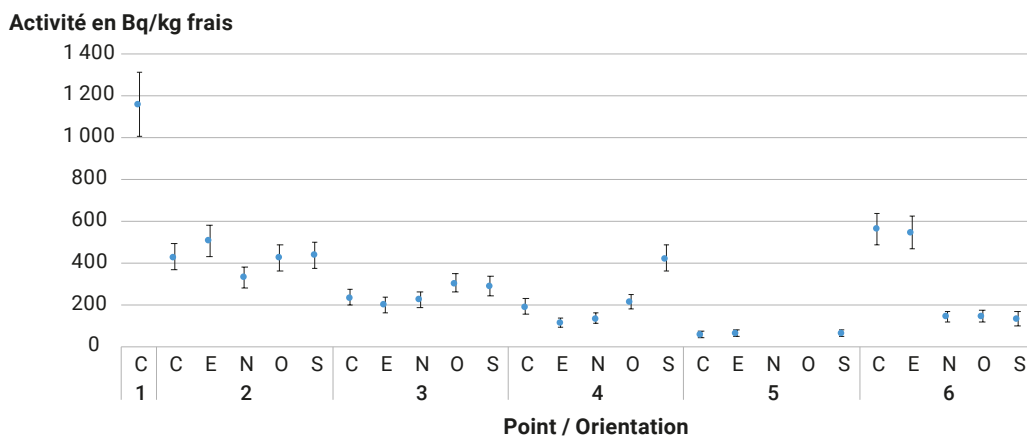
Ces hétérogénéités spatiales à l'échelle métrique ont pu être encore précisées au travers d'analyses d'échantillons de sols prélevés au niveau de 6 points particuliers repérés sur la figure 2 (carte du dispositif piéton) et sur lesquels 1 prélèvement central et 4 prélèvements cardinaux (N, S, E et O) situés à 5 mètres du point central ont été effectués. Le point n° 1, isolé, étant constitué d'une roche quasi-affleurante, il n'a été possible d'y procéder qu'à un seul prélèvement de surface sur 1 m².

FIGURE 2 / COMPARAISON DES MESURES DE DÉBIT DE DOSE ENTRE LE DISPOSITIF CARBORNE NaI 2 X 2 LITRES EMBARQUÉ DANS UN VÉHICULE ET LE DISPOSITIF NaI 3 POUCES PORTÉ DANS UN SAC À DOS (et points d'intercomparaison)



Les résultats des analyses de ^{234m}Pa dans ces échantillons, effectués par spectrométrie gamma et représentatifs des teneurs en uranium-238, sont présentés sur le graphique en figure 3.

FIGURE 3 / RÉSULTATS DES MESURES EN ^{234m}Pa DANS LES PRÉLÈVEMENTS SUR LES 6 POINTS (5 résultats par point)



Ces mesures confirment la grande variabilité des teneurs en uranium des sols à l'échelle décimétrique, allant de 60 Bq/kg sec (point 5) à plus de 500 Bq/kg sec (points 2 et 6). Une hétérogénéité qui apparaît également entre des prélèvements réalisés à quelques mètres de distance seulement. C'est notamment le cas au point n° 6 où l'on passe de 133 Bq/kg sec au cardinal sud à plus de 500 Bq/kg sec au centre et au cardinal est.

Variabilité de la teneur en radon de l'air extérieur

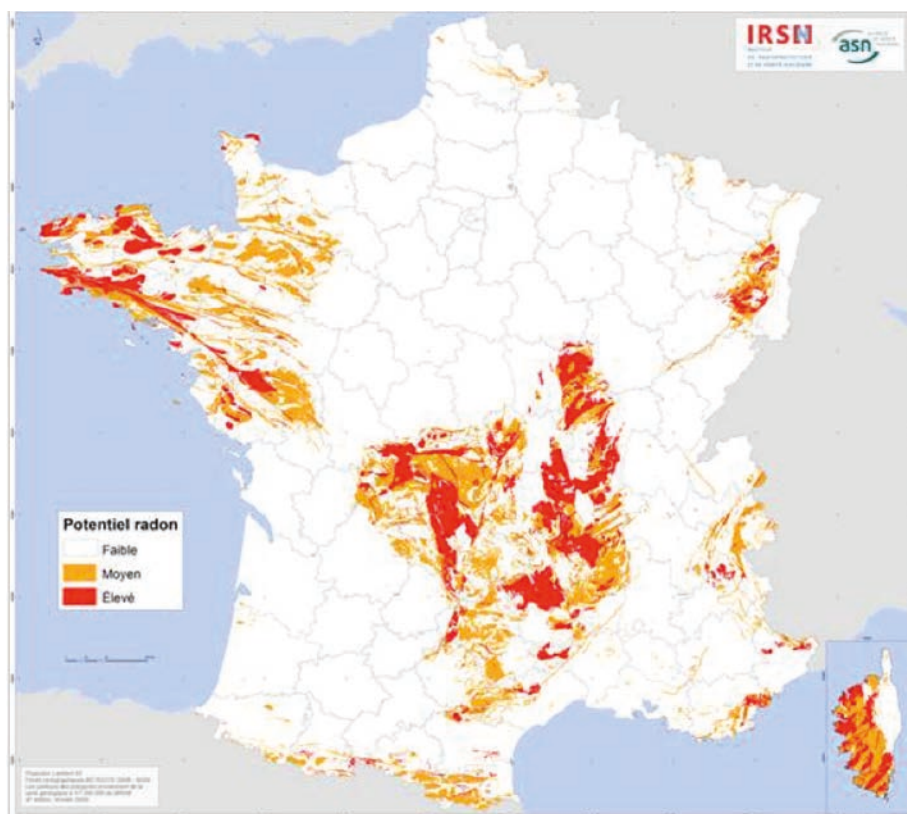
Le radon est un gaz radioactif omniprésent à la surface de la Terre où il se forme lors de la désintégration de l'uranium et du thorium naturellement présents dans les sols et les roches. Le radon existe sous trois isotopes (^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn) mais seul le radon-222 présente une demi-vie suffisamment longue (3,8 jours) pour permettre d'observer des activités volumiques non négligeables dans l'environnement. Le radon-222 fait partie de la chaîne de désintégration de l'uranium-238 et provient de la désintégration du radium-226 (figure 3 p. 46).

Le radon émane des sols et des roches, en quantité variable en fonction des propriétés de celles-ci (nature géologique, teneur en radium, porosité, perméabilité à l'air). Les activités volumiques du radon dans l'air présent dans le sol sont plus élevées dans les régions caractérisées par des roches plus riches en uranium telles que certains granites et certaines roches métamorphiques (Massif armoricain, Massif central, Vosges, Corse...), voire plus exceptionnellement

dans des formations sédimentaires (dans la région de Lodève par exemple) ou karstiques. Une grande variabilité des activités en radon peut donc être observée à l'échelle du territoire national, mais aussi comme pour le débit de dose, à l'échelle régionale et même communale. De plus, l'existence de certains paramètres géologiques structuraux (présence de failles, cavités souterraines, sources thermales...) peut constituer un facteur facilitant les conditions de transfert du radon vers la surface. La connaissance de la géologie du territoire a conduit à l'établissement d'une carte nationale du potentiel radon (figure 6), permettant de cibler les zones les plus propices à la production et au transfert du radon vers la surface du sol et l'atmosphère.

L'activité volumique du radon dans l'air du sol varie globalement entre 1 000 et plusieurs centaines de milliers de Bq/m^3 et présente des variations importantes en fonction de la nature des sols et des formations géologiques sous-jacentes. Des gammes de l'activité volumique du radon mesurée dans l'air du sol sont présentées dans le tableau 1.

FIGURE 6 / CARTE DU POTENTIEL RADON DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES À L'ÉCHELLE 1 : 1 000 000



En plus des propriétés des sols et des roches, l'émission du radon vers l'atmosphère dépend également des conditions météorologiques. Ces dernières (vent, pluies, froid, etc.) jouent sur la variation de l'activité en radon dans le temps en un lieu donné.

Les activités volumiques observées dans l'atmosphère sont beaucoup plus faibles que dans le sol : elles varient de quelques Bq/m³ à une centaine de Bq/m³, avec une moyenne de quelques dizaines de Bq/m³. Ces activités varient selon de nombreux facteurs dont la géologie du point considéré, la distance au sol, la topographie ainsi que les conditions atmosphériques. Par exemple, à l'échelle de quelques centaines de mètres, des écarts peuvent être observés entre un fond de vallée encaissé peu ventilé où le radon se concentre, une position intermédiaire en mi-pente et une zone sommitale mieux aérée où le radon se disperse plus facilement (cf. chapitre 5 relatif aux anciens sites miniers). Enfin, des fluctuations journalières en un même point peuvent être observées avec des valeurs plus élevées au niveau du sol aux coucher et lever du soleil, lorsque les circulations d'air sont réduites.

La figure 7 présente les activités volumiques du radon dans l'atmosphère mesurées à deux mètres au-dessus du sol le long d'une route dans la partie sud du massif des Vosges. Ces mesures ont été réalisées au moyen d'un laboratoire mobile se déplaçant de nuit à faible vitesse. Cette cartographie met en évidence de fortes variations spatiales. Ces variations s'expliquent par la variabilité des concentrations en uranium dans les roches sous-jacentes avec le passage de terrains granitiques au nord (relativement riches en uranium) à des roches volcano-sédimentaires au sud (significativement moins riches en uranium).

FIGURE 7 / ACTIVITÉ VOLUMIQUE DE RADON-222 MESURÉE DANS L'AIR AU COURS D'UNE NUIT (entre 22h et minuit) AU MOYEN D'UN LABORATOIRE MOBILE (mesure à 2 mètres du sol)

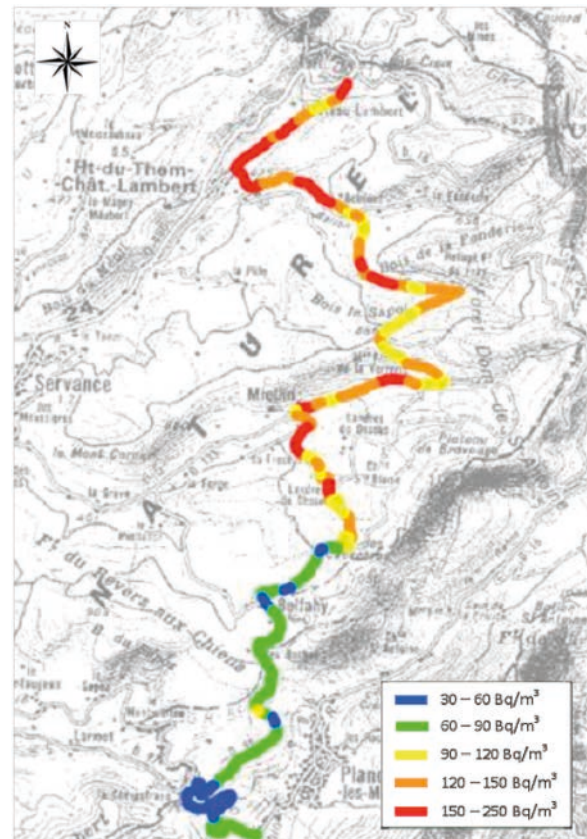


TABLEAU 1 / VARIABILITÉ DE L'ACTIVITÉ VOLUMIQUE DU RADON DANS L'AIR DU SOL, EN FONCTION DE LA GÉOLOGIE, D'APRÈS DES MESURES RÉALISÉES DANS PLUSIEURS RÉGIONS DE FRANCE

Nature des roches	Gamme de l'activité volumique du radon dans l'air du sol (Bq/m ³)	Activité volumique moyenne du radon dans l'air du sol (Bq/m ³)
Granites, orthogneiss	10 000 – 500 000	100 000
Formations sédimentaires et méta-sédimentaires	1 000 – 150 000	40 000
Formations volcaniques basiques	1 000 – 90 000	20 000

Variabilité des radionucléides descendants de l'uranium et du thorium dans l'environnement

Les radionucléides naturels présents dans le sol peuvent être absorbés par les racines des végétaux. Ceux présents dans l'air, notamment le polonium-210 et le plomb-210 descendants du radon, se déposent sur leurs feuilles. De tous les descendants des chaînes de désintégration de l'uranium et du thorium, ces deux radionucléides présentent les activités les plus élevées dans les denrées (figure 15 p. 74). Par ailleurs, l'absorption des isotopes du radium par les racines des végétaux est en général beaucoup plus forte que celle des isotopes de l'uranium ou du thorium. Il en résulte une activité en radium des végétaux plus importante.

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

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

Les teneurs en descendants des chaînes de l'uranium et du thorium des eaux de surface et des eaux souterraines sont extrêmement variables en raison de la variabilité des teneurs dans les roches et les sols, et aussi des caractéristiques physico-chimiques des eaux qui peuvent varier. Pour l'uranium-238, l'uranium-234, le radium-226 et le radium-228, les activités dans les cours d'eau, majoritairement inférieures à 0,1 Bq/L (plus de 95 %), vont de moins de 0,001 Bq/L jusqu'à atteindre exceptionnellement 1 Bq/L. Des valeurs plus élevées sont observées dans les eaux de surface sous influence des anciens sites miniers (cf. chapitre 5).

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

2.2. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE RÉMANENT DES RETOMBÉES ANCIENNES

La connaissance du bruit de fond environnemental des radionucléides artificiels hérités des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl répond à plusieurs objectifs : estimer les expositions des populations qui en résultent, déterminer les activités ajoutées du fait des rejets des installations nucléaires, et disposer d'un référentiel actualisé dans l'éventualité d'un accident ou de toute autre cause d'augmentation d'un niveau radiologique environnemental. Ce bruit de fond a fait l'objet d'un rapport de l'IRSN à paraître en 2022 dont sont extraits les éléments suivants.

Retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires

De 1945 à 1980 plus de 500 essais atmosphériques d'armes nucléaires ont été réalisés par les États-Unis, l'Union Soviétique, la Grande-Bretagne, la Chine et la France⁽¹⁾. L'essentiel des retombées radioactives s'est produit sur deux périodes : de 1951 à 1958 et de 1961 à 1962 avant le moratoire de 1963. Ces essais ont relâché dans l'atmosphère de nombreux radionucléides dont une vingtaine était régulièrement mesurée dans l'air en France (figure 18 p. 77), dans les eaux de pluie et diverses denrées. En 1963, au plus fort de ces retombées radioactives, l'activité moyenne de l'air en radionucléides artificiels a atteint 8 Bq/m³

(1) De très faibles puissances, les essais français au Sahara ont contribué de manière négligeable aux retombées globales en métropole ; par ailleurs, en raison d'échanges atmosphériques très limités entre les deux hémisphères, les essais français en Polynésie ont concerné essentiellement l'hémisphère sud.

(dont 6 Bq/m³ de tritium), celle des salades 650 Bq/kg frais (dont 1/3 de tritium et 1/5 de carbone-14), celle du lait 450 Bq/L (figure 8). La plupart des radionucléides de période radioactive courte (inférieure à 3 ans) issus de ces retombées ayant disparu, il ne subsiste aujourd'hui que le tritium, le carbone-14, le césium-137 (¹³⁷Cs), le strontium-90 (⁹⁰Sr), les isotopes 238, 239, 240 et 241 du plutonium (²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu et ²⁴¹Pu), et l'américium-241 (²⁴¹Am) provenant de la désintégration du plutonium-241.

Pour l'ensemble de ces radionucléides, à l'exception du tritium et du carbone-14, le sol constitue aujourd'hui le réservoir qui alimente toutes les autres composantes de l'environnement : l'air par remise en suspension, les végétaux par absorption racinaire et dépôt sur les feuilles des particules remises en suspension, les cours d'eau par drainage des sols et les animaux par ingestion. La figure 9 présente la carte des dépôts cumulés de plutonium-239+240, de césium-137 et de strontium-90 dans les sols à l'issue des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires. La majeure partie de ces dépôts radioactifs se sont constitués lors de précipitations. C'est pourquoi cette carte est le reflet des hauteurs moyennes annuelles des précipitations sur le pays.

Les activités de ces radionucléides dans les sols ont ensuite diminué, d'une part par décroissance radioactive et d'autre part en raison de différents phénomènes dont leur migration en profondeur. Cette diminution a entraîné la diminution de la concentration de ces radionucléides dans les denrées, et, de manière plus générale, dans toutes les autres composantes de l'environnement, mais à des vitesses très variables suivant les radionucléides et les régions (figure 13 p. 68).

Cas du strontium-90

Les activités de strontium-90 dans les sols ont pu diminuer de près de 100 fois depuis l'année des retombées maximales en 1963, passant de quelques dizaines de Bq/kg à moins de 1 Bq/kg. Cette diminution est liée en grande partie à la solubilité de cet élément qui facilite sa migration vers la profondeur des sols et son drainage vers les cours d'eau, et dans une moindre mesure à sa période radioactive (28 ans). Cette diminution est en partie à l'origine de celle des denrées : les activités de strontium-90 dans le lait sont passées de quelques Bq/L en 1963 à moins de 0,1 Bq/L ces dernières années. La baisse

FIGURE 8 / ACTIVITÉS DES SALADES (Bq/kg frais) ET DU LAIT (Bq/L) EN FRANCE AU PLUS FORT DES RETOMBÉES DES ESSAIS D'ARMES NUCLÉAIRES (1963), MAXIMALES LORS DES RETOMBÉES DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL (du 1^{er} au 5 mai 1986), FIN MAI 1986, EN 2009 ET AU COURS DES CINQ DERNIÈRES ANNÉES

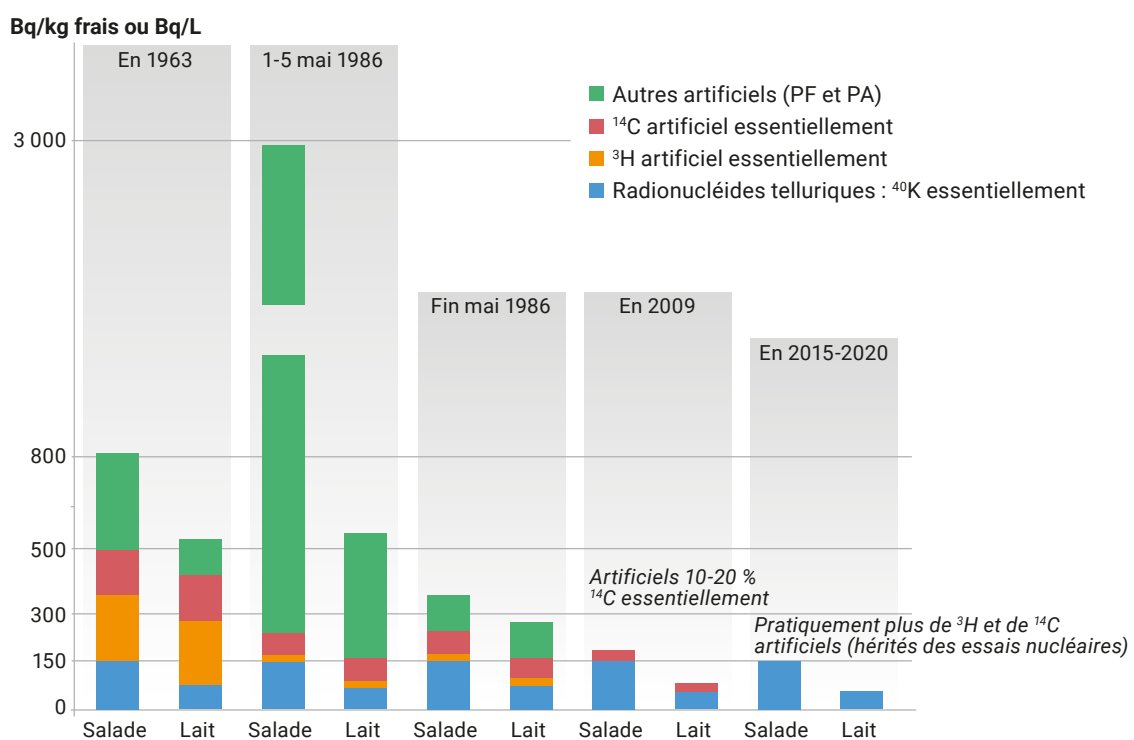
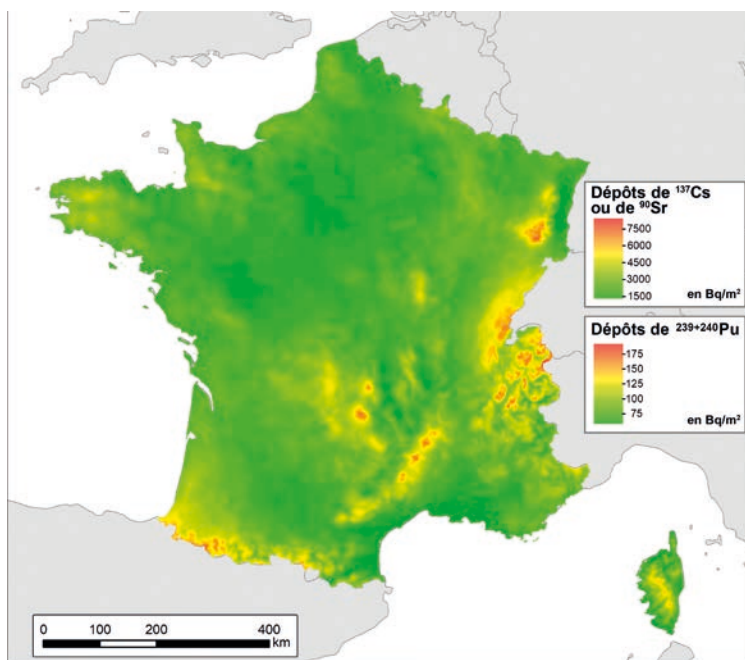


FIGURE 9 / DÉPÔTS DE CÉSIIUM-137, DE STRONTIUM-90 ET DE PLUTONIUM-239+240 AU TERME DES ESSAIS NUCLÉAIRES ATMOSPHÉRIQUES

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



des teneurs en strontium-90 des sols s'est également directement répercutée sur les cours d'eau. Ainsi, les activités volumiques de strontium-90 dissous dans les eaux de la Seine sont passées de 0,01 Bq/L en 1967 à 0,002 Bq/L sur la période 2008-2019. Dans les poissons de rivières, cette diminution a été de l'ordre de 100 fois entre 1978 et 2015 (de l'ordre de 1 Bq/kg frais dans les années 1970 à 0,01 Bq/kg frais ces dernières années).

Malgré cette diminution temporelle, les activités de strontium-90 restent conséquentes dans certaines denrées au regard des activités initialement déposées sur les sols, notamment dans les denrées végétales et les produits laitiers. Dans les céréales, les légumes et les fruits, elles sont comprises entre 0,01 et 1 Bq/kg frais (moyennes autour de 0,1 Bq/kg frais), soit du même niveau ou jusqu'à un ordre de grandeur plus élevée que celle de césium-137, malgré des activités nettement plus faibles dans les sols que celles du césium. Ceci s'explique par des transferts entre le sol et les plantes plus importants que ceux du césium. En revanche le strontium-90 n'est quasiment pas transféré aux muscles et sa concentration dans les viandes est très faible et le plus souvent non mesurable.

Cas des isotopes du plutonium et de l'américium-241

Les dépôts de plutonium consécutifs aux retombées des essais nucléaires (et à la désintégration du satellite américain SNAP9 en 1964) ont été de l'ordre de 40 fois plus faibles que ceux de strontium-90 ou de césium-137. Par ailleurs, ce radioélément ne s'est pratiquement pas déposé en France à la suite de l'accident de Tchernobyl. Comme le césium et contrairement au strontium, le plutonium migre peu vers la profondeur et se trouve toujours essentiellement dans les 10 cm de surface des sols, près de 60 ans après la fin de la principale période des essais atmosphériques. Il en résulte que sur la majeure partie du territoire, les activités massiques de plutonium à la surface des sols sont en moyenne de 0,2 à 0,4 Bq/kg secs, soit 20 à plus de 100 fois plus faibles que celles de césium-137 mais moins de 10 fois inférieures à celles de strontium-90 (dont les activités massiques ont fortement baissé au fil des décennies). Sur certaines zones des Vosges, du Massif central et d'altitude dans les Alpes et les Pyrénées, les activités massiques de plutonium dans les sols peuvent en moyenne atteindre 1 Bq/kg sec, exceptionnellement 2 Bq/kg sec pour les valeurs les plus élevées.

De plus, les transferts du plutonium aux végétaux et aux denrées animales sont très faibles : de 10 000 à 100 000 fois plus faibles que ceux du césium. Il en résulte que 60 % des échantillons analysés par l'IRSN au cours de la dernière décennie présentaient des activités de plutonium-239+240 trop faibles pour être quantifiées même au moyen des meilleures techniques disponibles. Dans la plupart des denrées et lorsqu'elles sont mesurables, les activités massiques, très variables, sont le plus souvent comprises entre 0,00001 et 0,001 Bq/kg frais (ou Bq/L).

Les activités de plutonium-238 peuvent être définies par rapport à celles de plutonium-239+240. Le rapport d'activités $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ dont la valeur était donc initialement de 0,04 (en 1970), a ensuite diminué en raison de la période radioactive du plutonium-238 pour être de 0,028 en 2020. Les plutoniums 238, 239 et 240 étant trois isotopes d'un même élément chimique, ils ont le même comportement dans l'environnement ; leurs intensités de transfert sont les mêmes et ce rapport d'activité est conservé dans toutes les composantes de l'environnement.

L'américium-241 ne figurait pas dans les retombées des essais nucléaires, il a été progressivement produit par la désintégration du plutonium-241 (période radioactive de 14 ans). Les concentrations en américium-241 augmentent donc au fil des années pour atteindre leur maximum en 2036 avant de diminuer très lentement par décroissance radioactive (430 ans de période). Bien que chimiquement différent, l'américium présente de nombreuses analogies de comportement avec le plutonium. Les résultats de mesures montrent que les activités d'américium-241 sont du même niveau que celles de plutonium-239+240 dans toutes les composantes de l'environnement. Plus encore, le rapport d'activité isotopique $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ théorique actuel de 0,4 y est partout maintenu. La connaissance du bruit de fond de l'américium-241 hérité des retombées anciennes dans l'environnement peut donc être déduite de celle du plutonium-239+240, et réciproquement.

Cas du tritium et du carbone-14

Contrairement aux autres radionucléides dont les retombées ont été spatialement hétérogènes, le réservoir de tritium et de carbone-14 pour l'ensemble de la biosphère reste l'air et leurs concentrations y sont très homogènes. Ces radionucléides intègrent les végétaux par la photosynthèse et, dès lors, suivent les cycles de la matière organique et de l'eau (dans le cas du tritium). De ce fait, les concentrations en tritium et en carbone sont assez homogènes au sein des milieux atmosphériques et continentaux (terrestres et aquatiques⁽²⁾) d'une part, et du milieu marin d'autre part⁽³⁾. Cette homogénéité ainsi que les particularités des transferts de ces deux radionucléides permettent de disposer d'indicateurs d'activités particuliers, communs à toutes les composantes de l'environnement. Pour le carbone-14, il s'agit de l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone (Bq/kg de carbone) ; pour le tritium, il s'agit de l'activité volumique exprimée en Bq/L d'eau, qu'il s'agisse d'eau de pluie, de cours d'eau, d'eau marine, d'eau contenue dans les organismes vivants ou d'eau issue de l'hydrogène contenu dans la matière organique. Ces indicateurs permettent de caractériser le bruit de fond de ces radionucléides dans toutes les composantes de l'environnement de manière beaucoup plus précise que les activités massiques et volumiques habituelles (Bq/kg frais ou sec ou Bq/L dans un échantillon), auxquelles elles sont cependant directement liées. Cette précision leur confère une meilleure sensibilité à déceler de très faibles influences des rejets d'une installation nucléaire et aussi la possibilité de suivre également avec précision, l'évolution temporelle des concentrations de ces deux radionucléides.

Hors de l'influence locale d'une installation nucléaire, les teneurs en carbone-14 et en tritium de la matière vivante végétale et animale sont en équilibre avec leur milieu de vie : l'air pour les organismes terrestres et l'eau pour les organismes marins et d'eau douce, ce qui se traduit dans le cas du carbone-14 par des activités par unité de masse de carbone égales et pour le tritium par des activités volumiques égales dans toutes les composantes de chacun de ces milieux.

(2) Dans le cas du carbone-14 en milieu aquatique continental, les niveaux sont plus faibles et plus hétérogènes (cf. focus, pp. 61-66).

(3) En raison de leur forte capacité de dilution de l'hydrogène et donc du tritium, les eaux marines ont été très peu influencées par les retombées de tritium des essais nucléaires, se distinguant ainsi des milieux atmosphériques et continentaux, si l'on excepte une possible influence terrestre locale dans les zones côtières.

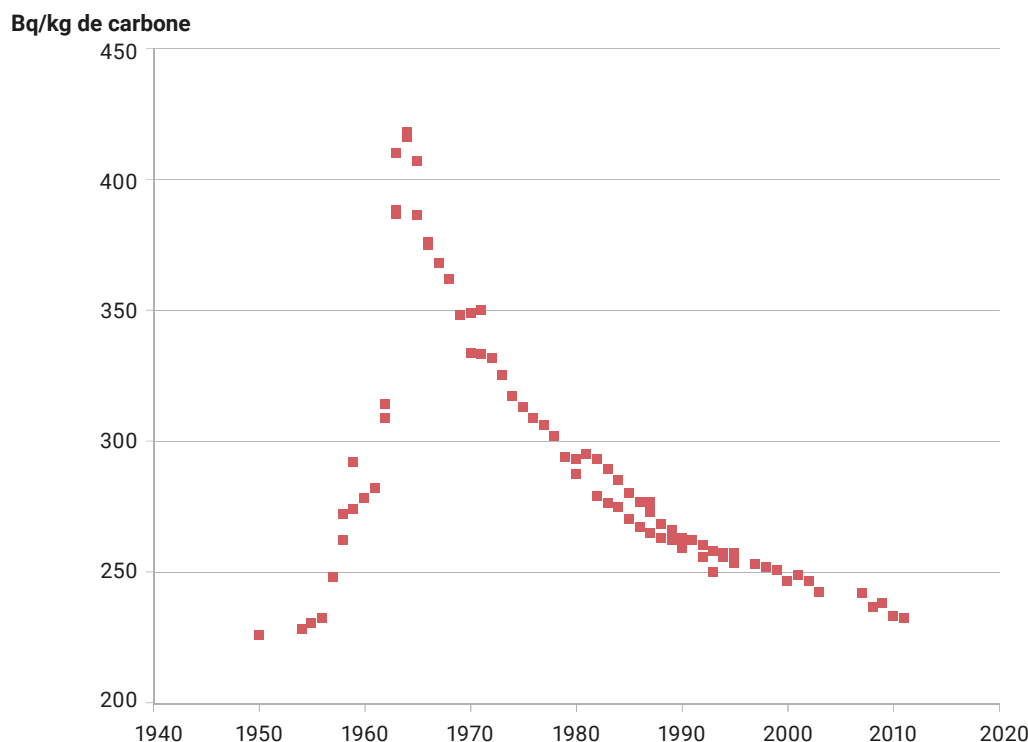
La figure 10 présente l'évolution de l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone, commune à tout l'hémisphère nord depuis 1950. Cette activité est passée du niveau cosmogénique de 226 Bq/kg de C, antérieur aux essais nucléaires (cf. chapitre 2.1 sur les radionucléides cosmogéniques), à près de 420 Bq/kg de C en 1963, au plus fort des retombées des essais atmosphériques américano-soviétiques. Si l'activité totale contenue dans le compartiment atmosphérique a peu diminué depuis (décroissance radioactive négligeable et faible prélèvement/fixation par la matière organique), l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone a, quant à elle, fortement diminué en raison de l'augmentation du CO₂ d'origine fossile. En effet, ce CO₂ dont la teneur en carbone-14 est au niveau cosmogénique, dilue le carbone-14 rémanent des essais nucléaires. Avec une valeur de 225 Bq/kg de C sur la période 2018-2020 (figure 1 du focus p. 61), l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone est en dessous du niveau cosmogénique antérieur aux essais nucléaires du fait d'une plus forte concentration de CO₂ dans l'air aujourd'hui qu'au début des années 1950. Une activité différente de plus de 7 Bq/kg de C autour de des valeurs de référence traduit une influence anthropique locale. Si l'activité par unité

de masse de carbone mesurée est supérieure, cela peut résulter de l'influence d'une installation nucléaire ; si cette activité massique est inférieure, cela peut résulter de l'influence d'une industrie rejetant du CO₂ d'origine fossile. L'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone permet donc de détecter de très faibles influences locales non mesurables par l'activité massique (Bq/kg frais).

Dans les cours d'eau et les lacs, l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone est toujours inférieure à celle observée dans les autres composantes de l'environnement en raison d'une dilution plus ou moins importante par des carbonates anciens, non affectés par les retombées des essais nucléaires qui sont présents dans le milieu.

Suivant cette teneur en carbonates, l'activité spécifique du carbone-14 dans les cours d'eau varie actuellement entre 200 et 220 Bq/kg de C. À l'inverse, la concentration du carbone-14 en milieu marin est très homogène et plus élevée que celle observée dans les milieux atmosphérique et terrestre, en raison du dégazage de matière organique terrigène ancienne stockée dans les sédiments.

FIGURE 10 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ SPÉCIFIQUE DU CARBONE-14 DANS L'HÉMISPHÈRE NORD DE 1950 À 2011, ÉTABLIE À PARTIR DE LA BIBLIOGRAPHIE ; L'ÉVOLUTION RÉCENTE OBSERVÉE EN FRANCE FAIT L'OBJET DE LA FIGURE 1 PAGE 61

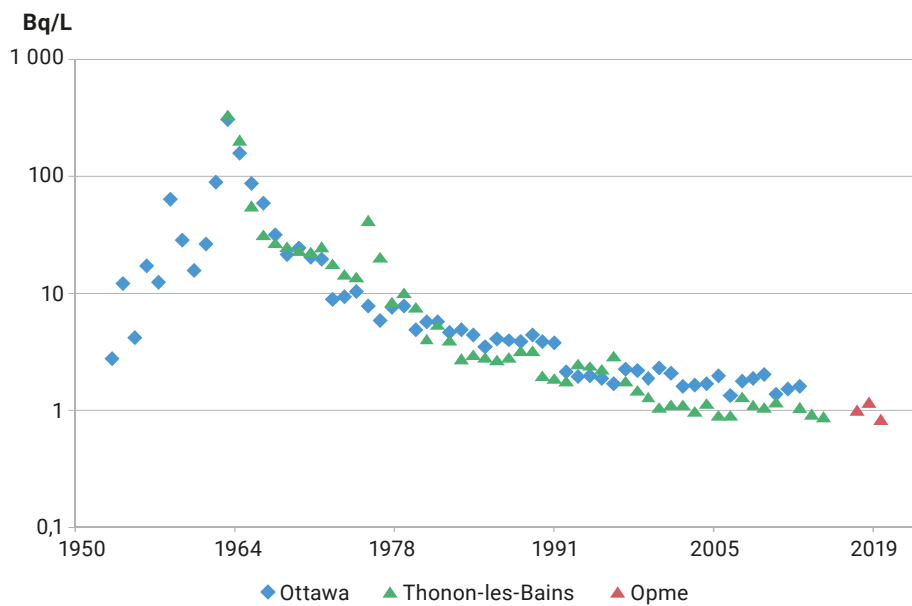


Comme pour le carbone-14, le réservoir du tritium rémanent des retombées des essais d'armes nucléaires est l'atmosphère. C'est également par la photosynthèse des végétaux que le tritium entre dans la composition de la matière organique dont l'activité, exprimée en Bq/L d'eau, est ainsi en équilibre (même activité) avec celle de la vapeur d'eau atmosphérique. Par ailleurs, le compartiment atmosphérique détermine l'activité des cours d'eau, notamment *via* les précipitations. L'évolution du bruit de fond du tritium dans l'ensemble atmosphère/milieu terrestre/aquatique continental peut donc être représentée par l'activité de l'eau de pluie. La figure 11 montre que

l'activité en tritium de l'eau de pluie dans l'hémisphère nord a augmenté brutalement à partir des années 1950 depuis le niveau cosmogénique (0,1 à 0,6 Bq/L ; cf. chapitre 2.1) pour atteindre un maximum de près de 600 Bq/L en 1963 au plus fort des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Depuis, cette activité a diminué pour se situer aujourd'hui à 1 Bq/L dans une gamme allant de 0,5 à 2 Bq/L. L'importance du réservoir d'hydrogène que constituent les océans a fait que les retombées des essais nucléaires n'ont eu qu'une faible influence sur l'activité en tritium des eaux marines qui sont restées au niveau cosmogénique (0,1 à 0,2 Bq/L).

FIGURE 11 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ EN TRITIUM DE L'EAU DE PLUIE (Bq/L, sources : AIEA et IRSN)

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



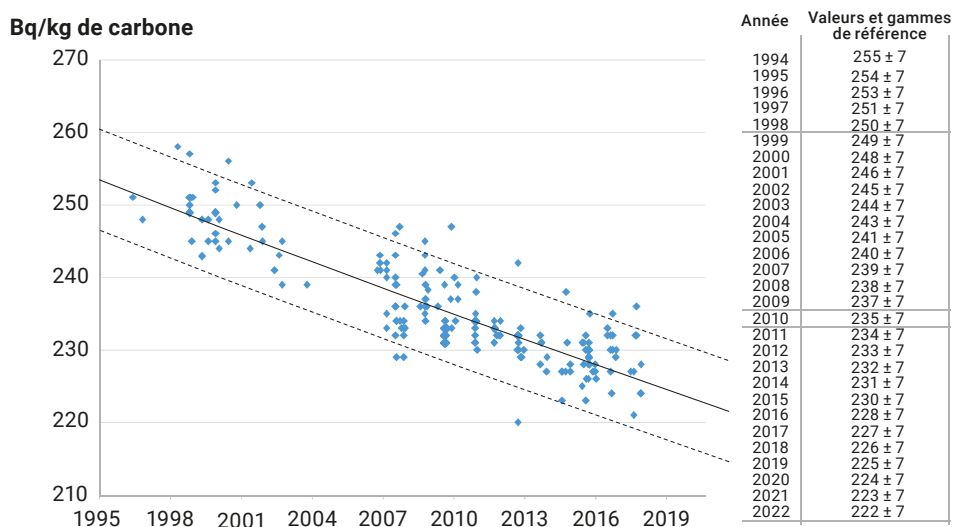
FOCUS
DIMINUTIONS DES BRUITS DE FOND
DU CARBONE-14 ET DU TRITIUM AU COURS
DES 30 DERNIÈRES ANNÉES

Les diminutions des concentrations du carbone-14 et du tritium dans l'environnement observées depuis 1963 (figure 10 p. 59 et figure 11 p. 60) se sont poursuivies au cours des trente dernières années.

La figure 1 présente les activités de carbone-14 par unité de masse de carbone mesurées depuis 1995 par l'IRSN dans des échantillons de différents types de végétaux. Les valeurs de cet indicateur sont représentatives de la teneur en carbone-14 de l'air et de toutes les composantes de l'environnement terrestre. L'analyse statistique de cette tendance (régression exponentielle) permet d'obtenir la courbe bleue et les valeurs de référence annuelles correspondantes qui sont mentionnées dans le tableau. L'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone a ainsi diminué de 255 Bq/kg de C en 1994 à 225 Bq/kg de C en 2019, cette dernière valeur se situant déjà en dessous du bruit de fond naturel cosmogénique antérieur aux essais nucléaires (au début des années 1950). Et la diminution devrait se poursuivre dans les années à venir si les concentrations en CO₂ de l'air, issu de la combustion de sources d'énergie fossile, continue d'augmenter.

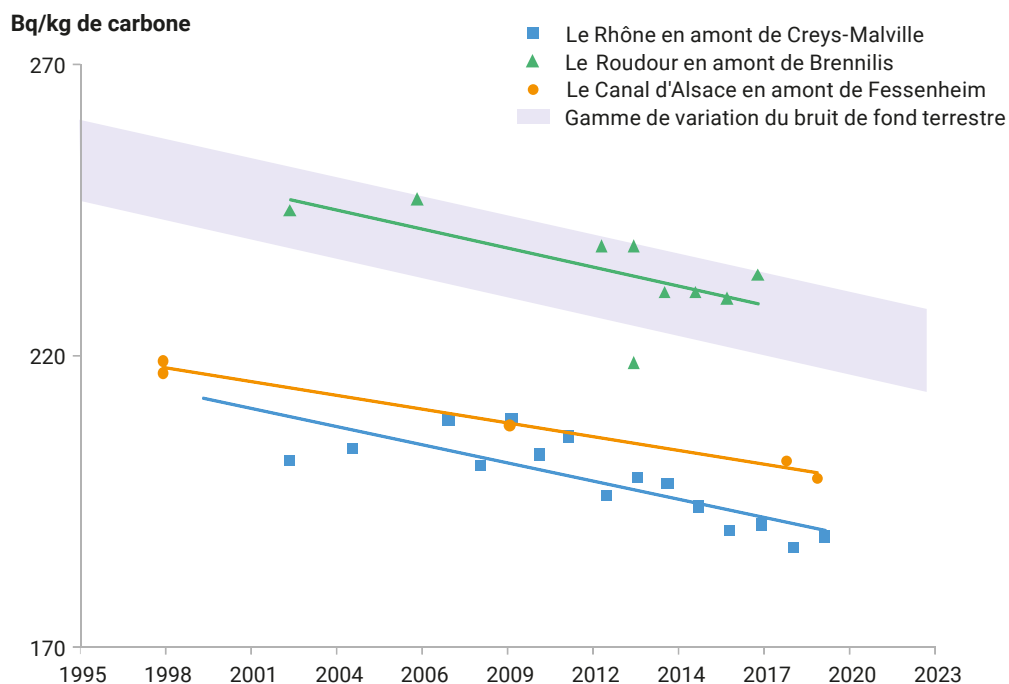
Quatre-vingt-quinze pourcents des activités mesurées par l'IRSN depuis 1995 sont compris dans la gamme délimitée par la valeur de référence annuelle plus ou moins 7 Bq/kg de carbone. Le bruit de fond du carbone-14 en milieu terrestre est donc connu avec une incertitude de l'ordre de 3 % seulement au niveau de confiance de 95 %. Les activités massiques exprimées en Bq/kg frais ou en Bq/L peuvent être déduites de ces valeurs. Ainsi, la teneur en carbone du lait étant comprise entre 0,06 et 0,07 kg/L, l'activité volumique du carbone-14 dans le lait correspondant à une activité par unité de masse de carbone de 225±7 Bq/kg de C (valeur en 2019), est comprise entre 13 et 16 Bq/L.

FIGURE 1 / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DE CARBONE-14 PAR UNITÉ DE MASSE DE CARBONE MESURÉES PAR L'IRSN DANS DIFFÉRENTS TYPES DE VÉGÉTAUX TERRESTRES PRÉLEVÉS DEPUIS 1995 ; VALEURS ET GAMMES DE RÉFÉRENCE ANNUELLES CORRESPONDANTES (Bq/kg de carbone)



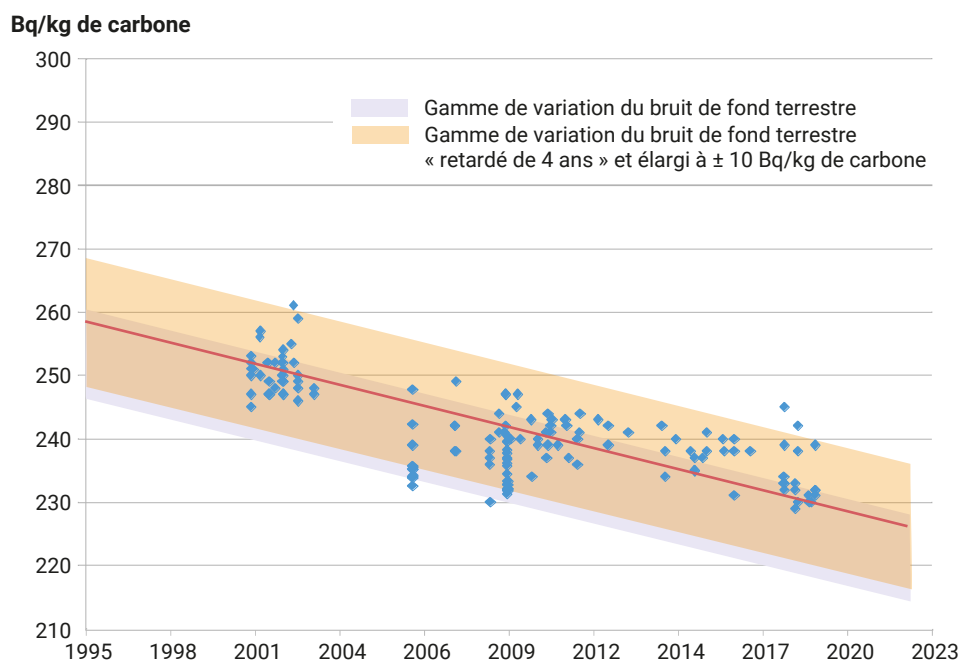
La présence, dans les cours d'eau et les lacs, de quantités très variables de carbonates anciens dépourvus ou pauvres en carbone-14, induit une dilution plus ou moins importante des apports terrigènes de ce radionucléide (dont les activités suivent les valeurs de référence précédentes). Il en résulte que la teneur en carbone-14 en milieu aquatique continental est à la fois plus faible et beaucoup plus variable qu'en milieux atmosphérique et terrestre. La figure 2 présente à titre d'illustration l'évolution des teneurs en carbone-14 de plantes aquatiques prélevées dans 3 cours d'eau : le Roudour en amont de Brennilis, le Rhône en amont de Creys-Malville et le canal d'Alsace en amont de Fessenheim. Le Roudour qui traverse des sols peu calcaires de Bretagne contient peu de carbonates et la teneur en carbone-14 des plantes aquatiques y est dans la gamme du bruit de fond en milieu terrestre. En revanche, le canal d'Alsace et le Rhône, qui circulent à ces endroits en terrain calcaire, ont une plus forte teneur en carbonates anciens qui « diluent » le carbone-14 terrigène ; il en résulte des activités par unité de masse de carbone nettement inférieures à celles qui prévalent en milieu terrestre mais qui suivent cependant la même pente de diminution.

FIGURE 2 / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DE CARBONE-14 PAR UNITÉ DE MASSE DE CARBONE MESURÉES PAR L'IRSN DANS DES PLANTES AQUATIQUES PRÉLEVÉES DEPUIS 1998 DANS 3 COURS D'EAU (Bq/kg de carbone)



La figure 3 montre que les activités de carbone-14 représentatives du bruit de fond mesurées par l'IRSN dans différents organismes marins (algues et mollusques) prélevés sur les côtes françaises de Méditerranée et de l'Atlantique, sont très proches de celles mesurées en milieu terrestre, quoique légèrement supérieures et plus variables. Il est possible que ce léger excès de carbone-14 par rapport au bruit de fond terrestre soit la conséquence d'un décalage dans le temps ; les niveaux observés en milieu marin pourraient être « en retard » sur ceux observés en milieux terrestres. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la source de carbone-14 en milieu marin est notamment imputable à des apports détritiques d'une matière organique terrestre qui s'est formée quelques années auparavant à partir du $^{14}\text{CO}_2$ atmosphérique ; cette matière organique a sédimenté avant de se dégrader, libérant alors du $^{14}\text{CO}_2$ qui est ensuite ramené en surface par des phénomènes désignés sous le terme de « pompes biologiques ». On peut noter qu'un décalage de seulement 4 années, assorti d'une variabilité de ± 10 Bq/kg de carbone (au lieu de ± 7 Bq/kg de carbone), permet de déterminer une gamme de référence du carbone-14 en milieu marin qui couvre plus de 90 % des 141 activités mesurées.

FIGURE 3 / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DE CARBONE-14 PAR UNITÉ DE MASSE DE CARBONE MESURÉES PAR L'IRSN DANS DES ALGUES ET DES MOLLUSQUES MARINS PRÉLEVÉES DEPUIS 2000 SUR LES CÔTES FRANÇAISES DE MÉDITERRANÉE ET DE L'ATLANTIQUE (Bq/kg de carbone)

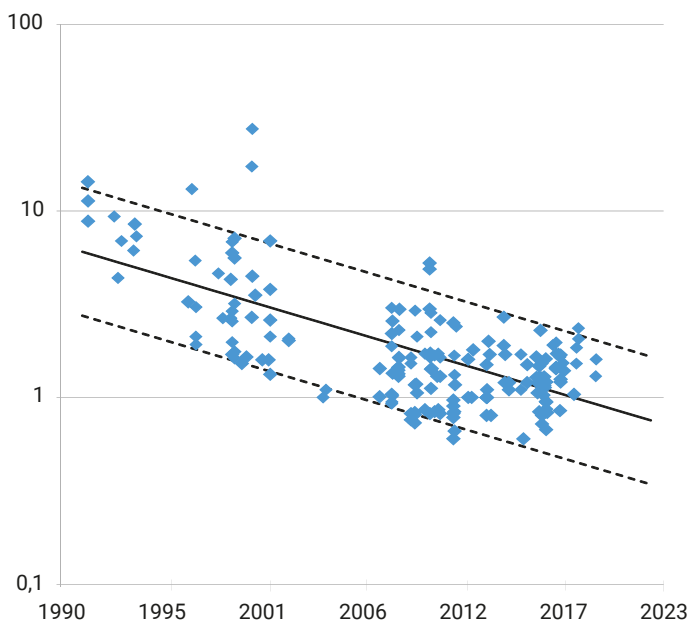


Les activités de tritium en milieux atmosphérique, terrestre et aquatique continental ont également poursuivi leur diminution au cours des dernières décennies (on rappelle que les retombées des essais nucléaires ont eu une bien moindre influence sur le milieu marin).

La figure 4 présente les activités de tritium lié (en Bq/L d'eau de combustion) mesurées par l'IRSN dans des feuilles d'arbre, des herbages et différents types de denrées d'origine végétale et animale depuis 1991. L'analyse statistique de régression permet de déterminer des valeurs de référence annuelles qui sont fournies dans le tableau joint. L'activité volumique du tritium dans les échantillons biologiques terrestres est passée en 20 ans de 6 Bq/L en 1991 à 0,9 Bq/L en 2020 ; soit une diminution de 7 fois en 30 ans, soit plus de 2 fois plus rapidement que la diminution imputable à la décroissance radioactive de 12,3 ans (un facteur 3 sur la période). Cette diminution devrait se poursuivre encore quelques années pour atteindre le bruit de fond cosmogénique (cf. chapitre 2.1) qui prévalait avant les essais nucléaires et qui était de 0,2 à 0,6 Bq/L.

FIGURE 4 / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DE TRITIUM LIÉ MESURÉES PAR L'IRSN DANS DES FEUILLES D'ARBRE, DES HERBAGES ET DIFFÉRENTS TYPES DE DENRÉES D'ORIGINE VÉGÉTALE ET ANIMALE DEPUIS 1991 (Bq/L d'eau de combustion)

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

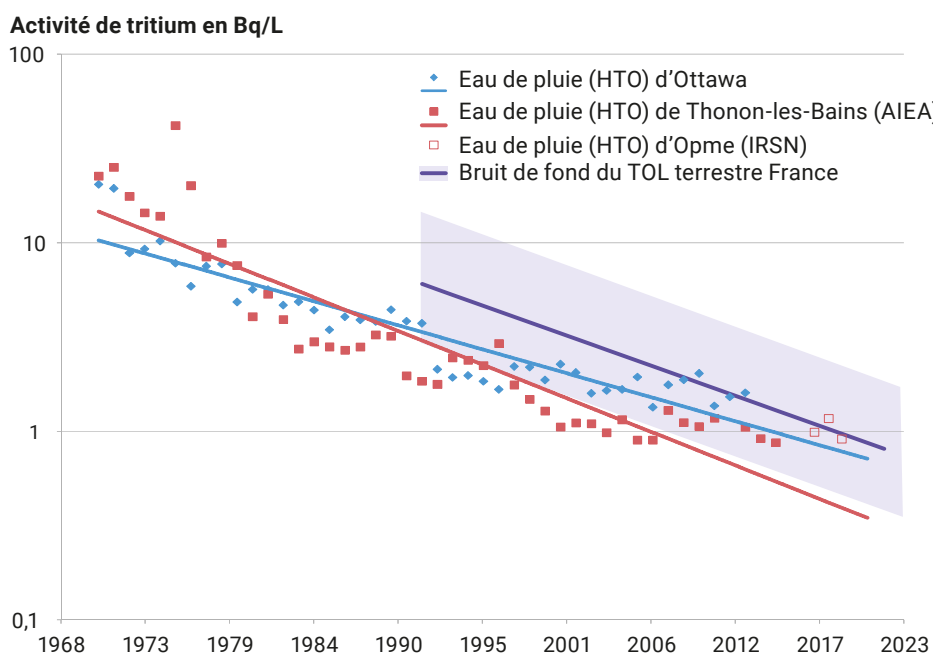


Année	Valeurs et gammes de référence
1991	6,0 (2,8 - 13)
1992	5,7 (2,6 - 12)
1993	5,3 (2,4 - 12)
1994	4,9 (2,2 - 11)
1995	4,6 (2,1 - 10)
1996	4,3 (2,0 - 10)
1997	4,0 (1,8 - 8,9)
1998	3,8 (1,7 - 8,3)
1999	3,5 (1,6 - 7,8)
2000	3,3 (1,5 - 7,3)
2001	3,1 (1,4 - 6,8)
2002	2,9 (1,3 - 6,4)
2003	2,7 (1,2 - 5,9)
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)

Cette diminution des teneurs en tritium des échantillons biologiques issus du milieu terrestre va de pair avec celle de l'activité du HTO atmosphérique ; c'est ce que montre la figure 5 qui permet de comparer depuis 1991, les teneurs en tritium des eaux de pluie d'Ottawa, de Thonon-les-Bains⁽¹⁾ et d'Opme, aux valeurs de référence acquises en milieu terrestre. Toutefois, les teneurs en tritium dans les échantillons végétaux et animaux terrestres sont en moyenne supérieures à celles des eaux de pluie. Cet écart, qui atteint au maximum un facteur 2 (en 2020 entre le milieu terrestre et les eaux de pluie d'Ottawa), s'explique en partie par le fait qu'il existe en milieu terrestre, une rémanence du TOL formé au cours d'années antérieures, dont l'activité volumique est donc plus élevée, et qui est libéré dans l'air lors de la dégradation de la matière organique. Cette rémanence se traduit par un « retard apparent » des activités TOL en milieu terrestre par rapport au milieu atmosphérique qui serait de l'ordre d'une dizaine d'années. Les pentes de diminution sont assez proches.

La figure 4 montre également la variabilité autour des valeurs de référence annuelles du bruit de fond du TOL : 90 % de l'ensemble des résultats d'échantillons de toute nature présentés dans cette figure sont compris dans une gamme délimitée par la moitié et le double des valeurs de référence (plus précisément entre les valeurs de références divisées par 2,2 et multipliées par 2,2). Dans le graphique, cette gamme de variabilité est représentée par le bandeau violet.

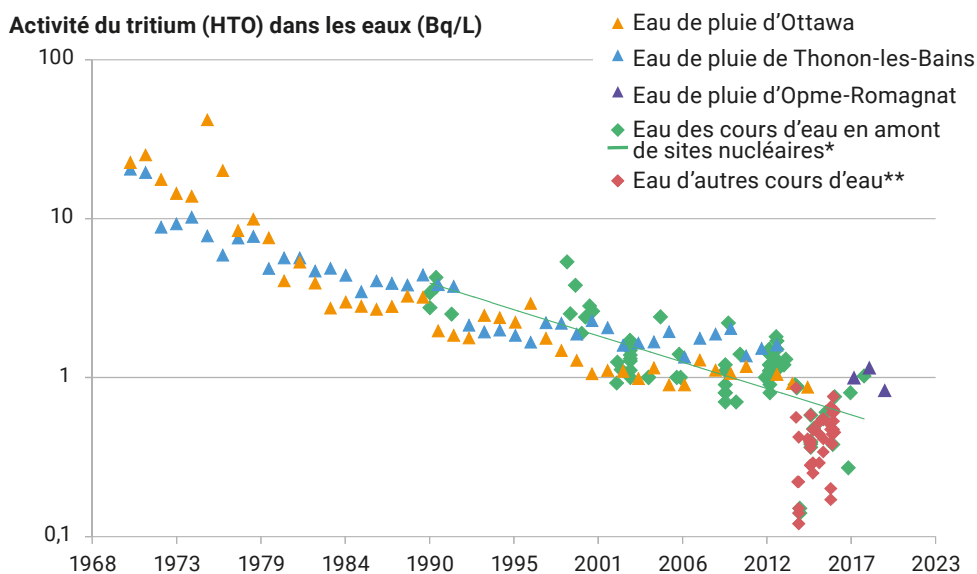
FIGURE 5 / ÉVOLUTIONS COMPARÉES DES ACTIVITÉS DE HTO DANS LES EAUX DE PLUIES D'OTTAWA ET DE THONON-LES-BAINS (Bq/L) ET LES ACTIVITÉS DE TOL (Bq/L d'eau de combustion) DANS LES ÉCHANTILLONS DE VÉGÉTAUX ET PRODUITS ANIMAUX TERRESTRE PRÉLEVÉS EN FRANCE



(1) Les courbes de tendance des eaux de pluie ont été déterminées depuis 1970, excluant les années 1960 durant lesquelles la diminution était plus rapide.

La figure 6 montre que les activités en tritium dans l'eau des grands fleuves ou rivières en amont des installations nucléaires, sont très proches de celles des eaux de pluie sur la même période et que leur évolution au fil des années va de pair. Toutefois, une étude menée par l'IRSN de 2014 à 2016, montre que les activités des eaux de 17 cours d'eau de moindre débit du sud de la France sont en moyenne 2 fois inférieures à celle des eaux de pluie. L'écart s'explique principalement par un temps de résidence souterrain très long des eaux des nappes phréatiques qui les alimentent. Les activités volumiques les plus faibles (de 0,1 à 0,2 Bq/L) observées dans ces cours d'eau peuvent être jusqu'à 10 fois inférieures à celles des eaux de pluie, et ainsi se trouver au niveau naturel cosmogénique (aucune influence des essais nucléaires).

FIGURE 6 / ÉVOLUTION COMPARÉE DES ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS LES EAUX DE PLUIE ET DES COURS D'EAU (Bq/L)



* Rhône, Canal d'Alsace, Seine, Meuse, Durance

** Agly, Argout, Ardèche, Argens, Aude, Cèze, Clamoux, Gapeau, Gardon, Hérault, Orb, Ouvèze, Tarn, Tech, Thoré et Var.

Retombées de l'accident de Tchernobyl

Les masses d'air contaminées par l'accident de Tchernobyl ont affecté la France au début de mai 1986, principalement entre le 1^{er} et le 5 mai 1986. En raison des pluies très variables survenues durant cette période dans l'est du pays, les dépôts radioactifs y ont été plus importants que dans le reste du pays et très hétérogènes (figure 12 p. 68). 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. Les dépôts d'iode-131 ont été de l'ordre de 5 à 10 fois supérieurs à ceux de césium-137 ; ceux de césium-134 deux fois inférieurs à ceux de césium-137.

La contamination des denrées a été maximale immédiatement après les dépôts du fait d'interception de ceux-ci par les feuilles des végétaux ; elle a concerné essentiellement les légumes, notamment les légumes feuilles (quelques milliers de Bq/kg frais d'iode-131 et de l'ordre de 1 000 Bq/kg frais de césium-134 et césium-137) et le lait (quelques centaines de Bq/L d'iode-131 et de l'ordre de 100 Bq/L de césium-134 et césium-137) du fait de la contamination foliaire des herbages. Les activités en iode-131 ont disparu au bout de 3 mois par décroissance radioactive et celles de césium-134 et césium-137 dans ces denrées ont diminué de 100 à 1 000 fois dans ce délai. Les activités de césium les plus élevées dans les viandes ovines et bovines (quelques milliers de Bq/kg frais de césium-134 et césium-137) ont été observées au bout de quelques semaines. En raison de la date de l'accident très précoce dans le développement de la plupart des cultures, les grandes cultures céréalières et fruitières ont été relativement épargnées : leurs activités ont rarement dépassé 10 Bq/kg frais. Passé les premiers mois après les dépôts radioactifs, la contamination des denrées ne résultait plus que de celle du sol qui constitue le réservoir alimentant toutes les autres composantes de l'environnement. En raison de sa période radioactive de 2 ans, les concentrations de césium-134 ont rapidement diminué et n'étaient quasiment plus mesurables dans l'environnement dès la fin des années 1990.

Cas du césium-137

Dans les sols, le césium-137 qui s'est déposé en mai 1986 après l'accident de Tchernobyl est venu s'ajouter à celui rémanent des retombées des essais nucléaires. À noter que si dans l'est du pays, le césium-137 est très majoritairement imputable aux retombées de l'accident de Tchernobyl, dans les 2/3 ouest, il peut provenir de manière importante, voire majoritaire, des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires.

Les activités massiques de césium-137 dans les sols diminuent depuis la fin des retombées atmosphériques anciennes. Cette diminution est plus rapide que celle qui résulterait de la seule décroissance radioactive (période radioactive de 30 ans). Elle est due principalement à l'action de l'eau qui entraîne les particules de sols les plus contaminées situées à sa surface vers les cours d'eau et vers la profondeur, ainsi qu'au labour des surfaces cultivées qui tend à homogénéiser le césium dans une couche de 10 à 25 cm de profondeur, et facilite son entraînement par l'eau. La contamination des sols français a ainsi diminué en moyenne de 2 à 4 fois entre 1991 et 2016. Cette moyenne cache une importante variabilité suivant les caractéristiques des sols.

Les concentrations de césium-137 dans les denrées ont également diminué depuis 1987. Cette diminution est liée à celle des concentrations du césium dans les sols mais aussi à la diminution de sa bio-disponibilité (une partie du césium se fixe progressivement de manière irréversible sur les particules d'argile des sols et devient ainsi de moins en moins disponible pour être absorbée par les racines des végétaux). La figure 13 p. 68 présente, à titre d'exemple, l'évolution de 1966 à 2013, de l'activité du césium-137 dans le lait produit dans différentes régions de France parmi les plus touchées par les retombées des essais nucléaires et par les retombées de l'accident de Tchernobyl. Cette figure montre notamment que la diminution de la teneur en césium-137 du lait, qui répercutait principalement celle des fourrages donnés aux animaux, a été très variable suivant les régions. Elle met ainsi en évidence qu'il existe parmi les régions de France les plus touchées par les retombées anciennes, des zones où leur rémanence est plus élevée du fait notamment des caractéristiques des sols. C'est notamment le cas des prairies d'altitude des Alpes (Mercantour), de certaines zones des Vosges et du Massif central. Cette variabilité spatiale du bruit de fond du césium-137 en France fait l'objet du focus pp. 69 à 71.

FIGURE 12 / CARTE DES ACTIVITÉS SURFACIQUES DE CÉSIMUM-137 DÉPOSÉES À LA SUITE DES RETOMBÉES DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL (Bq/m²)

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

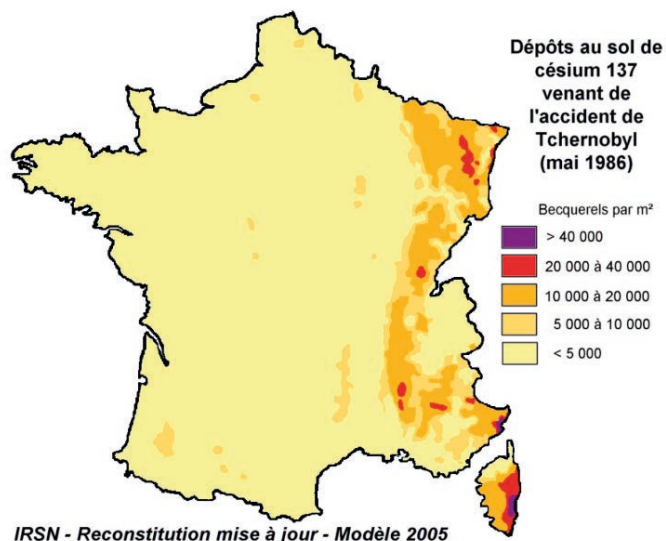
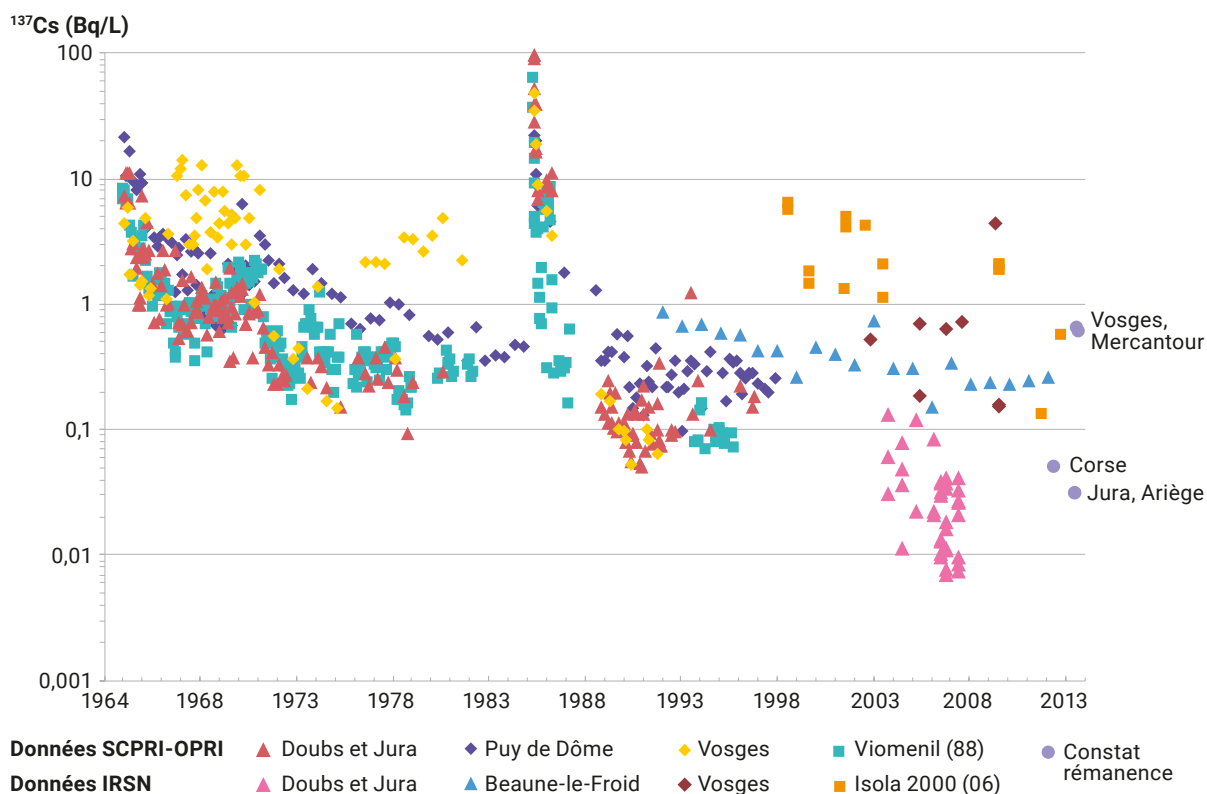


FIGURE 13 / ÉVOLUTION DEPUIS 1964 DES ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE CÉSIMUM-137 DANS LE LAIT PRODUIT DANS DIVERSES RÉGIONS DE FRANCE (Bq/L)



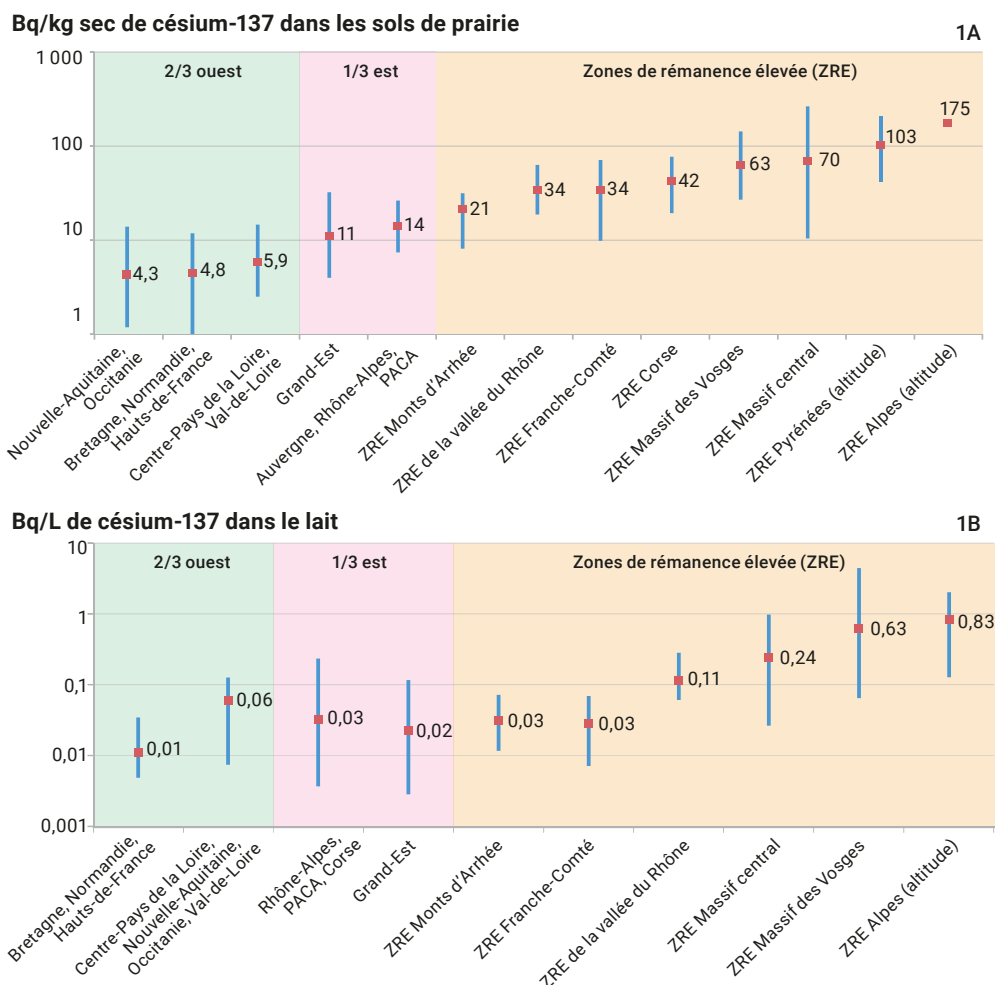
VARIABILITÉ SPATIALE DU BRUIT DE FOND DU CÉSIMUM-137 EN FRANCE

FOCUS

Bien que les hétérogénéités spatiales des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires (figure 9 p. 57) et de l'accident de Tchernobyl (figure 12 p. 68) se soient estompées au fil des années en raison des comportements

différents que peuvent avoir les radionucléides suivant les caractéristiques de l'environnement (types de sols, climat...) et les pratiques agricoles et d'élevage, les concentrations de ces radionucléides dans certaines composantes de l'environnement peuvent rester encore aujourd'hui spatialement contrastées. Les mesures mettent ainsi nettement en évidence des zones de rémanence élevée (ZRE) de ces retombées anciennes. C'est plus particulièrement le cas du césium-137 dans les sols. Dans certains sols qui ont reçu des dépôts de plus 10 000 Bq/m² de ce radionucléide en mai 1986 et qui sont propices à sa rétention, les activités massiques moyennes peuvent être 5 à 15 fois supérieures à celles des sols des 2/3 ouest du pays (figure 1A). Ces écarts se répercutent dans les herbages et dans le lait des animaux qui les consomment (figure 1B).

FIGURE 1 / ACTIVITÉS MASSIQUES (Bq/kg sec) ET VOLUMIQUES (Bq/L) DE CÉSIMUM-137, MESURÉES PAR L'IRSN DANS DES ÉCHANTILLONS DE SOL DE PRAIRIE (1A) ET DE LAIT DE VACHE (1B) PRÉLEVÉS ENTRE 2008 ET 2018



Mais le contraste le plus important est observé dans les denrées naturelles, champignons et gibiers notamment. Des myrtilles, des framboises et des fraises cueillies dans les ZRE de l'est de la France peuvent présenter des activités de quelques dizaines de Bq/kg frais de césium-137, alors que les fruits de verger se trouvent à des niveaux de l'ordre de 1 000 fois inférieurs. De même, si la teneur en césium-137 de la viande de bœuf se situe entre 0,01 et 0,2 Bq/kg frais, celle de sangliers chassés en ZRE peut dépasser 100 Bq/kg frais.

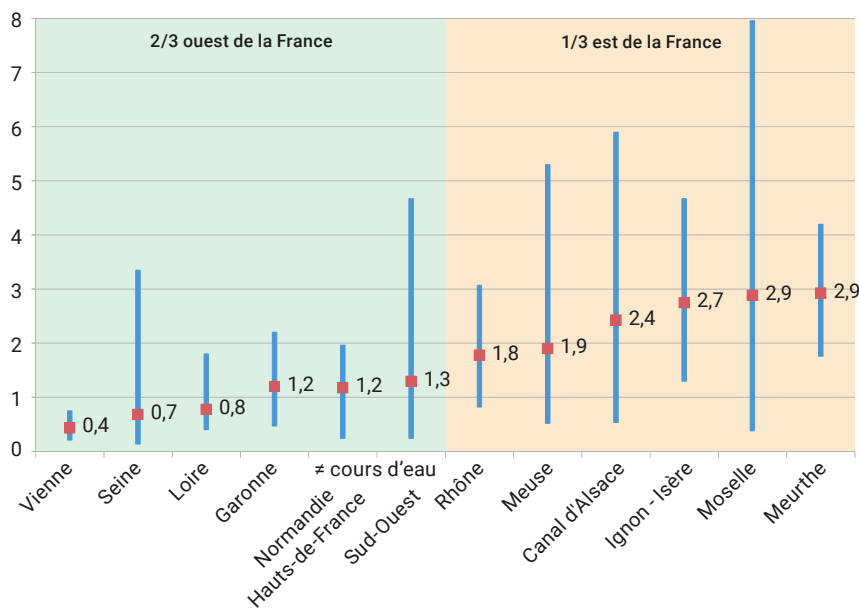
Les teneurs en césium-137 des produits agricoles sont en général plus homogènes et plus faibles en raison principalement des pratiques agricoles, et notamment de l'utilisation d'engrais, qui tendent à estomper la variabilité spatiale des dépôts radioactifs initiaux et à diminuer le transfert du césium des sols vers les plantes. Ainsi, les activités massiques de césium-137 dans les légumes, les fruits et les céréales se trouvent essentiellement entre 0,001 et 0,1 Bq/kg frais au cours de la dernière décennie et sont homogènes quelle que soit leur région de production.

Le césium-137 parvient aux milieux aquatiques principalement par le drainage des bassins versants. Bien que les grands cours d'eau desquels proviennent la majeure partie des échantillons analysés soient longs et traversent donc des sols touchés de manière variable par les retombées anciennes, des écarts de concentrations en césium-137 sont observés entre ceux de l'est du pays (Rhône, Moselle, Meuse, Rhin et canal d'Alsace), ceux dont seulement une partie amont du cours draine des zones modérément touchées (Loire et Vienne), et ceux circulant très majoritairement dans des territoires peu touchés par les retombées anciennes (Garonne et Seine).

C'est notamment le cas pour les plantes aquatiques (figure 2) et aussi pour les poissons : 0,02 et 0,04 Bq/kg frais pour les poissons prélevés dans la Garonne et la Seine, 0,07 Bq/kg frais pour ceux prélevés dans la Meuse et le Rhône et 0,1 Bq/kg frais pour ceux pêchés dans le Rhin ; et aussi des sédiments : 2 à 3 Bq/kg sec dans la Garonne et dans une vingtaine de petits cours d'eau du Sud-Ouest, de Normandie et des Hauts-de-France, 4 à 6 Bq/kg sec pour la Loire, le Rhône, la Meuse et le canal d'Alsace et jusqu'à 10 Bq/kg sec dans l'Isère, la Durance et la Moselle.

FIGURE 2 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE CÉSIMUM-137 (en Bq/kg sec) MESURÉES DANS DES PLANTES PRÉLEVÉES DANS DES COURS D'EAU FRANÇAIS ET ANALYSÉES PAR L'IRSN ET SUBATECH ENTRE 2008 ET 2019

Césium-137 dans les plantes aquatiques (Bq/kg sec)





En milieu marin, les activités massiques et volumiques de césium-137 sont plus homogènes, en raison du caractère dispersif de ce milieu. Ainsi, sur toutes les côtes françaises, y compris en Manche, les teneurs moyennes en césium-137 des algues sont comprises entre 0,2 et 0,3 Bq/kg sec, quand celles des coquillages sont de l'ordre de 0,01 Bq/kg frais en Méditerranée et en Atlantique, atteignent 0,02 Bq/kg frais à l'embouchure du Rhône et dépassent cette valeur en Manche sous influence des rejets de La Hague pour atteindre 0,05 Bq/kg frais (ces valeurs mesurées en Manche ne relèvent clairement plus du seul bruit de fond hérité des retombées anciennes).

Les hétérogénéités spatiales observées dans les sols sont à l'origine d'une variabilité spatiale des débits de dose dans l'air et donc des doses externes. Il en est de même, de la variabilité dans certaines denrées qui se répercute sur les doses efficaces liées à leur ingestion.

La variabilité spatiale liée aux dépôts initiaux mise en évidence pour le césium-137 n'est observée, et dans une moindre mesure, que pour les sols dans le cas du plutonium et de l'américium-241. Ceci résulte du fait que l'hétérogénéité spatiale des retombées des essais nucléaires a été moins prononcée que celle de l'accident de Tchernobyl, et enfin que ces éléments sont très peu transférés dans les végétaux et les produits animaux. Dans le cas du strontium-90, même si les activités les plus élevées sont quelquefois mesurées dans des échantillons provenant de ZRE, la variabilité spatiale est peu discernable. Outre les pratiques agricoles déjà évoquées pour le césium et la moindre hétérogénéité des retombées des essais nucléaires déjà mentionnée pour les transuraniens, ceci résulte également du fait que ce radionucléide a plus migré vers la profondeur des sols, et ce de manière différentielle suivant leurs caractéristiques, effaçant ainsi l'hétérogénéité spatiale des concentrations du strontium-90 qui était cependant bien visible au cours des années 1960 et 1970.

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

2.3. GAMMES D'ACTIVITÉS MASSIQUES ET VOLUMIQUES DU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS

Les figures 14 à 19 présentent les activités des principaux radionucléides mesurés en France et qui contribuent au bruit de fond radiologique métropolitain. Il s'agit soit de radionucléides naturels (cf. chapitre 2.1), soit de radionucléides rémanents des retombées anciennes (cf. chapitre 2.2). Les données à l'origine de ces graphiques ont été acquises depuis 2009 par l'IRSN dans différents cadres. Afin d'être plus complet, certaines séries dont les origines sont précisées, ont été ajoutées. Il s'agit d'une représentation en « boîtes-à-moustaches » qui permet de visualiser les gammes d'activités correspondant à 80 % des valeurs significatives mesurées (activités comprises entre les percentiles 10 % et 90 % représentées par le rectangle coloré), les modes (percentile 50 % ou médiane) représentés par le tiret coupant en deux les rectangles colorés, ainsi que les valeurs maximales mesurées (tirets supérieurs). Ces valeurs statistiques sont représentatives des mesures effectuées par l'IRSN et ne constituent qu'une approche de la réalité. Notamment, seuls les résultats de mesure significatifs, supérieurs au seuil de décision (cf. chapitre 9 des annexes) ont été pris en compte ; les activités environnementales les plus faibles, non mesurables, 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 d'analyses et le nombre de résultats significatifs exploités sont fournis pour chaque série de données au niveau de l'axe des abscisses. Même si ce nombre est élevé, des biais peuvent avoir influencé les indicateurs statistiques présentés, notamment pour les radionucléides naturels. En effet, les teneurs en radionucléides naturels sont très contrastées en France, entre les bassins sédimentaires et les massifs anciens. Or, les zones des massifs anciens plus riches en descendants de l'uranium et du thorium, sont peu représentées dans les échantillons prélevés et analysés par l'IRSN. Pour compenser ce biais, la figure 16 p. 75 permet de comparer les activités sur des sites caractérisés par un haut niveau de radioactivité naturelle (notés HNRN), à celles acquises sur le reste de la France métropolitaine.

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

FIGURE 14 / ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES DANS LES SOLS ET LES SÉDIMENTS FRANÇAIS (Bq/kg sec)

Bien que les teneurs moyennes des sols et des sédiments en plutonium-239+240, héritées des retombées des essais nucléaires, semblent assez homogènes sur la France, la variabilité observée dans les sols non cultivés traduit la variabilité des dépôts que montre la carte de la figure 9 p. 57 : des activités de plutonium plus importantes sur les massifs montagneux en raison de précipitations moyennes annuelles plus élevées. Les activités de césium des sols sont quant à elles globalement cohérentes avec les cartes des dépôts des essais nucléaires (figure 9) et de l'accident de Tchernobyl (figure 12 p. 68) : des activités plus faibles à l'ouest qu'à l'est et plus élevées sur les zones où les retombées ont été les plus importantes (zones de rémanence élevée, cf. focus pp. 69 à 71). Par ailleurs, les points chauds d'altitude, petites surfaces de moins de 1 m² où les dépôts neigeux de mai 1986 se sont reconcentrés, présentent à l'issue de la fonte de la neige des activités beaucoup plus élevées : de l'ordre de 10 000 Bq/kg sec. Les activités en césium-137 des sols sont plus élevées que celles du strontium-90 pour deux raisons principales : d'une part les retombées de l'accident de Tchernobyl sont venues s'ajouter, notamment dans l'est du pays, à celles des essais nucléaires, et par ailleurs le strontium étant plus mobile dans les sols, une part plus importante de ses activités initialement déposées ont été entraînées vers la profondeur des sols. Concernant les teneurs en radionucléides naturels telluriques descendants des chaînes de l'uranium et du thorium, les données permettent de discriminer les sols des bassins sédimentaires (moyenne de 26 Bq/kg sec), des sols des massifs anciens (moyenne de 44 Bq/kg sec), et des sols provenant de zones à très haut niveau de radioactivité naturelle (données de Haute-Vienne et de Saône-et-Loire). Enfin, les activités en potassium-40 sont, comme attendu, plus élevées et homogènes entre sols et sédiments. Pour chaque catégorie de sols ou de sédiments sont fournis le nombre de résultats exploités (supérieurs au seuil de décision) et le nombre total de résultats de mesure (exemple : 262n/270).

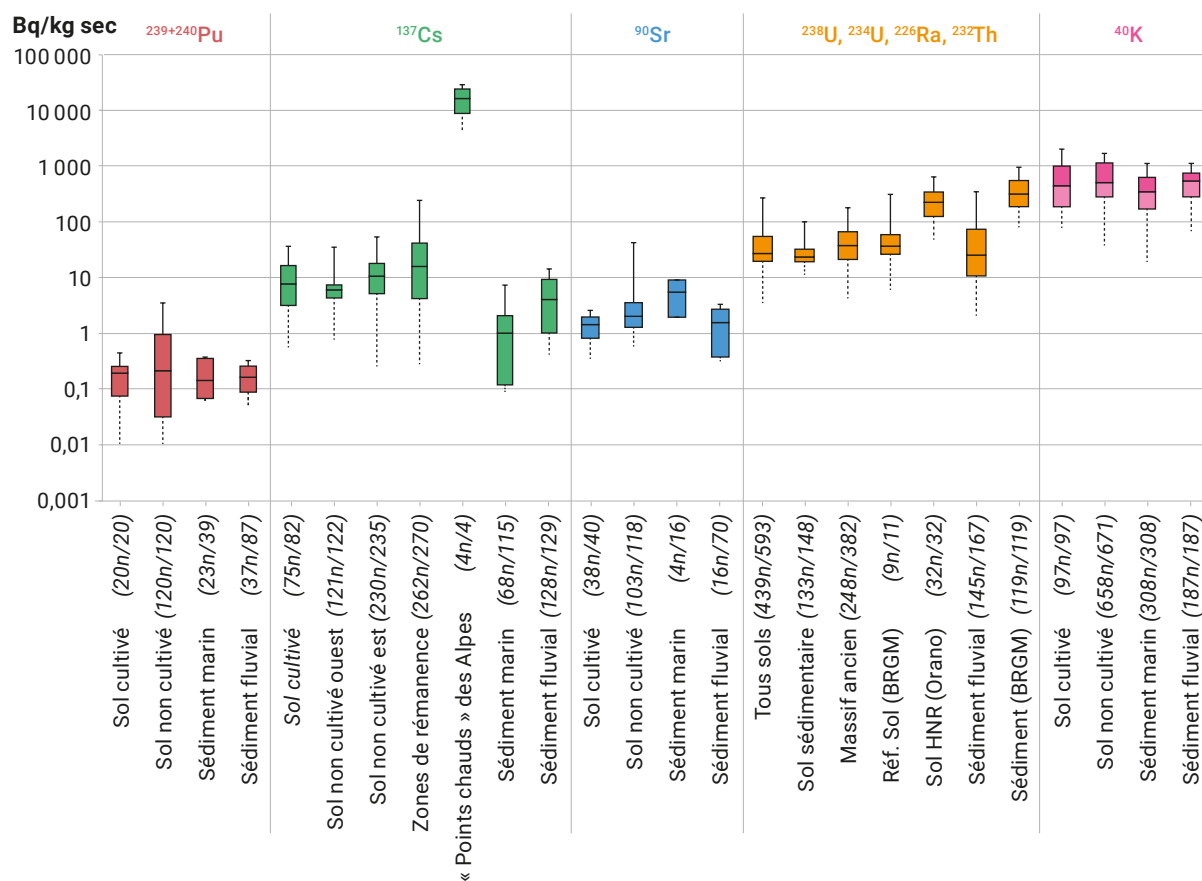


FIGURE 15 / ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES NATURELS DANS LES DENRÉES PRODUITES EN FRANCE (Bq/kg frais)

Les activités des principaux radionucléides naturels dans les denrées s'étalent sur plus de 4 ordres de grandeur. Les activités en uranium en milieu terrestre sont plus faibles que celles du radium en raison d'une plus faible absorption racinaire. Elles sont plus élevées en milieu marin en raison de la solubilité de cet élément dans l'eau de mer. Les activités des denrées terrestres en plomb-210 et polonium-210, plus élevées que celles du radium, résultent du dépôt sur les feuilles des végétaux de ces deux radionucléides présents dans l'air après émanation du radon. Si les activités de ces deux radionucléides sont proches dans l'air et en milieu terrestre, celles du polonium-210 sont nettement plus élevées en milieu marin. En effet, pour des raisons non complètement expliquées scientifiquement, le polonium se concentre dans le plancton et donc dans tous les organismes qui s'en nourrissent : les coquillages, les crustacés et dans une moindre mesure les petits poissons. En tant que nutriment essentiel, la teneur en potassium et donc les activités en potassium-40 de la matière organique sont les plus élevées de toutes. Pour chaque catégorie de denrées sont fournis le nombre de résultats supérieurs au seuil de décision et le nombre total de résultats de mesure (exemple : 10n/12).

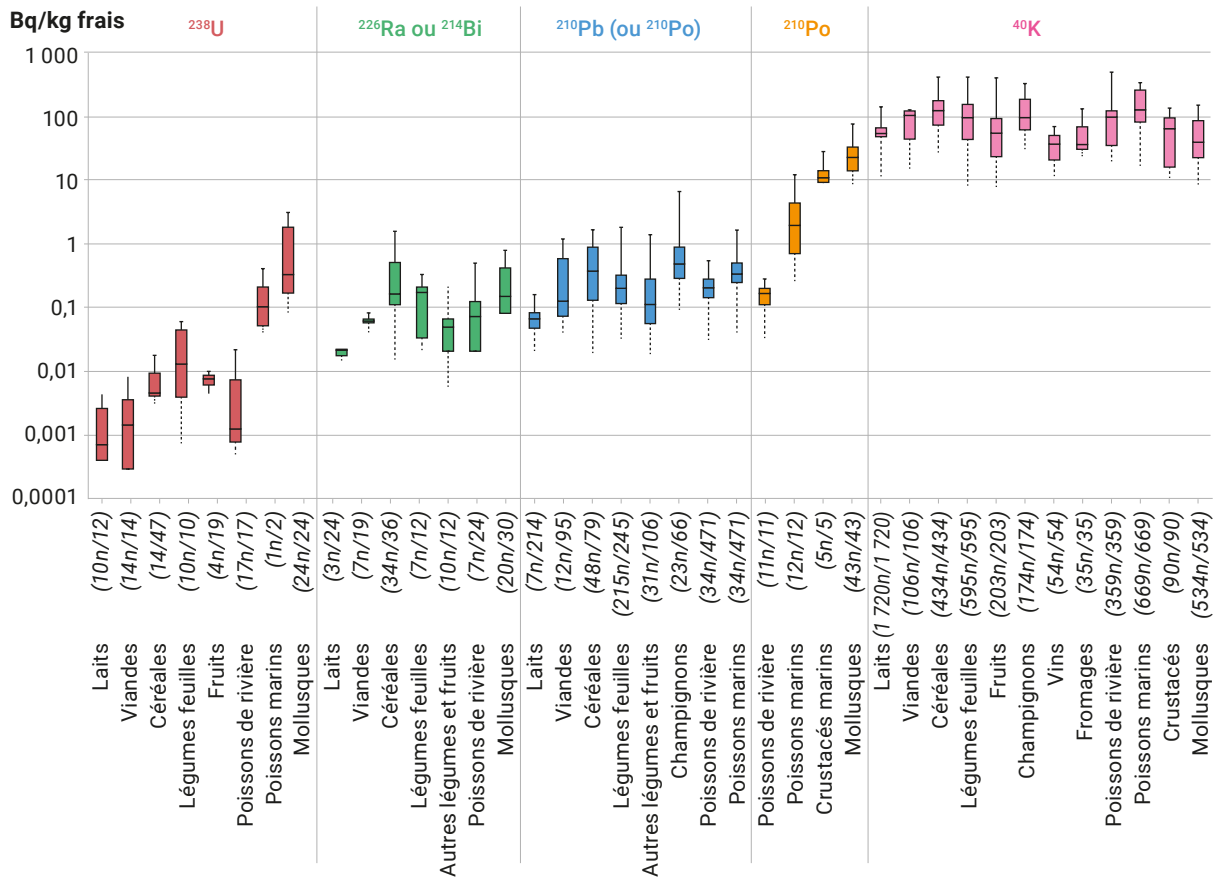


FIGURE 16 / COMPARAISON DES ACTIVITÉS (Bq/kg frais) DE CERTAINES DENRÉES PRODUITES SUR DES ZONES À HAUTS NIVEAU DE RADIOACTIVITÉ NATURELLE (HNRN principalement de Haute-Vienne et de Saône-et-Loire) AVEC CELLES PRODUITES PRINCIPALEMENT EN ZONES SÉDIMENTAIRES (bassins parisiens, aquitains, vallées fluviales...)

Comme indiqué précédemment, les données présentées dans la figure 15 p. 74 sont plutôt représentatives de grandes plaines alluviales et de bassins sédimentaires où les sols présentent des teneurs en uranium faibles à moyennes. La figure 16 permet d'illustrer le cas de zones à Haut niveau de radioactivité naturelle (HNRN) telles que l'on peut en trouver dans les Massifs central, armoricain, vosgien ou en Corse. Pour différentes catégories de denrées, cette figure permet de comparer les activités mesurées dans ces zones HNRN (en ton sombre sur le graphique) avec les activités « de référence » présentées dans la figure 15 (en ton clair sur le graphique). Sur les zones HNRN, les gammes d'activités des radionucléides naturels sont le plus souvent supérieures, voire très supérieures à celles représentatives du reste de la France. C'est à ces données acquises sur les HNRN que doivent être comparées les activités mesurées autour des anciens sites miniers présentées dans le chapitre 5. Pour chaque catégorie de denrées sont fournis le nombre de résultats exploités (supérieurs au seuil de décision) et le nombre d'analyses (exemple : 8n/20).

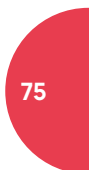
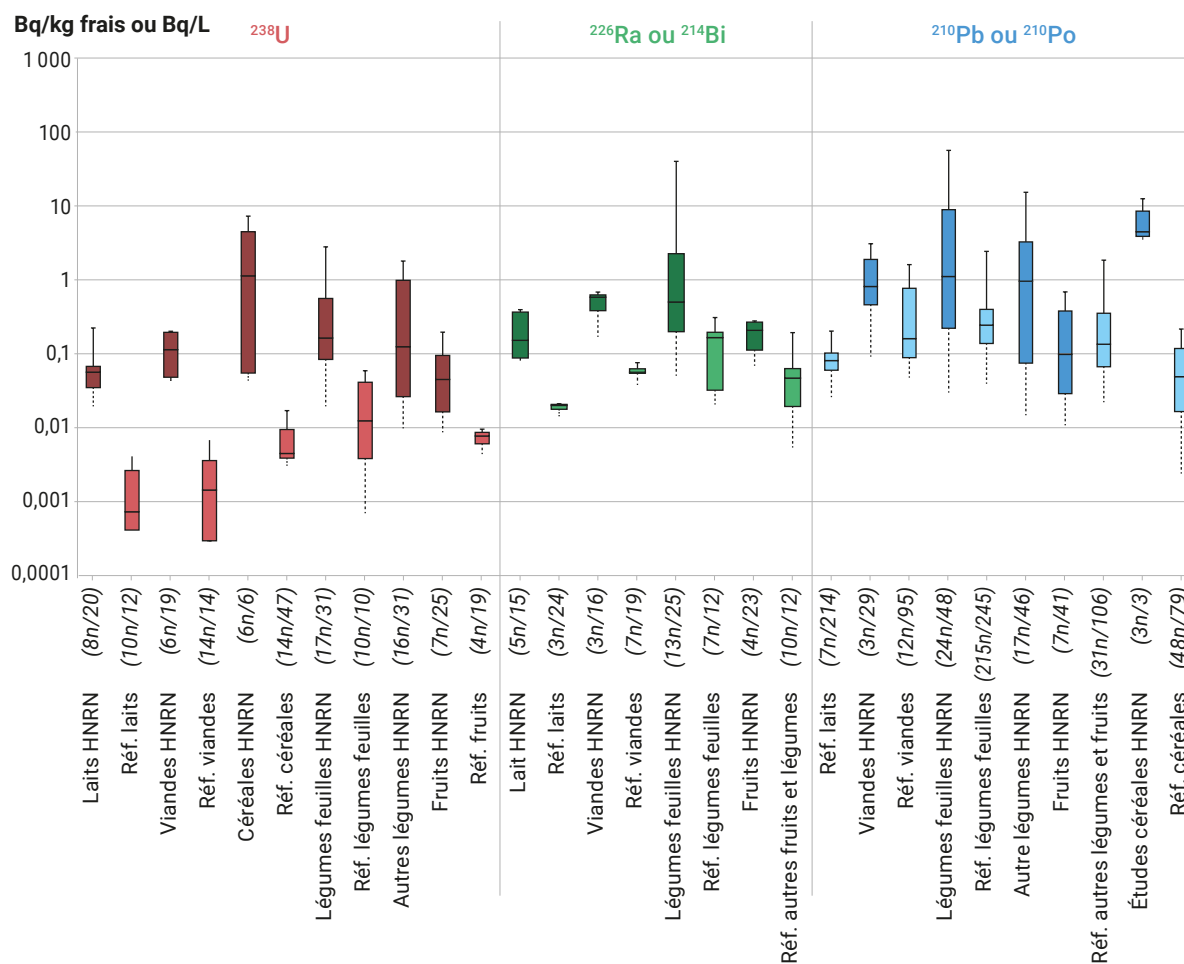


FIGURE 17 / ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS DANS LES DENRÉES PRODUITES EN FRANCE (Bq/kg frais)

La figure 17 présente les activités des principaux radionucléides artificiels dans les denrées produites en France. Ces activités sont liées essentiellement à la rémanence des retombées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl (pour le césium-137). Les raisons principales : (1) lors des retombées des essais nucléaires, les dépôts de $^{239+240}\text{Pu}$ ont été de l'ordre de 100 fois plus faibles que ceux du césium-137 ou du strontium-90, (2) le césium-137 des retombées de l'accident de Tchernobyl est venu s'ajouter à celui déposé lors des essais nucléaires, et (3) le transfert racinaire du plutonium est beaucoup plus faible que celui du césium ou du strontium (figure 14 p. 73). Les niveaux de ces deux radionucléides dans les denrées sont du même ordre en raison d'un transfert racinaire du strontium plus important. Les denrées sauvages (champignons, baies et gibiers) constituent un cas particulier, la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl étant beaucoup plus importante en milieu forestier. Les activités du tritium en milieu terrestre sont très proches, quel que soit le type de denrée, et en équilibre avec celles de l'air qui constitue le réservoir de ce radionucléide. Elles résultent toujours pour l'essentiel de la rémanence des retombées des essais nucléaires, même si l'on se rapproche du niveau naturel cosmogénique. Ce niveau naturel cosmogénique, de l'ordre de 10 fois inférieur, est celui que l'on observe en milieu marin ; en raison de l'abondance de l'hydrogène cosmogénique, ce milieu n'a quasiment pas été affecté par les retombées des essais nucléaires. De même, le carbone-14 a une origine naturelle mais provient encore principalement de la rémanence des essais d'armes nucléaires. Pour chaque catégorie de denrées sont fournis le nombre de résultats exploités (supérieurs au seuil de décision) et le nombre total de résultats de mesure (exemple : 3n/11).

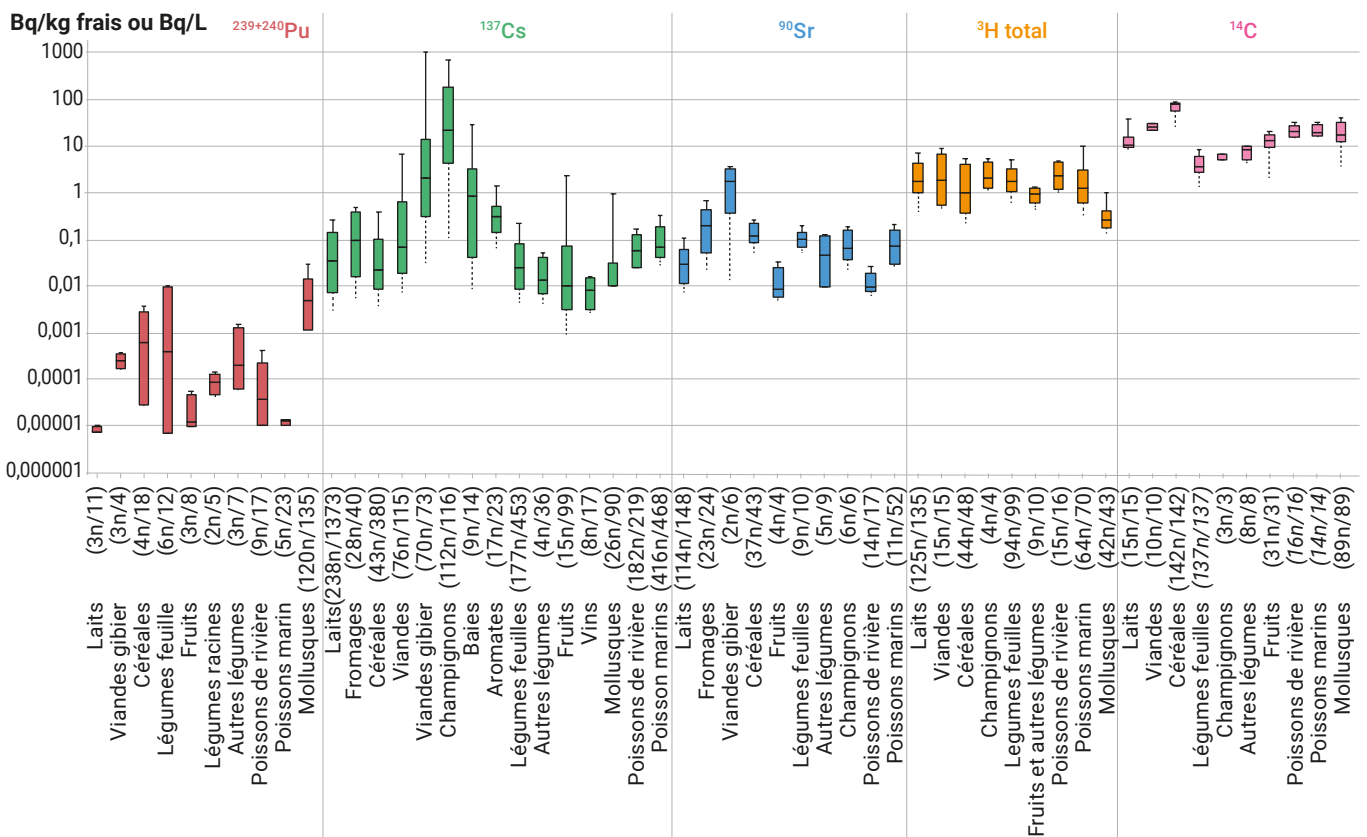
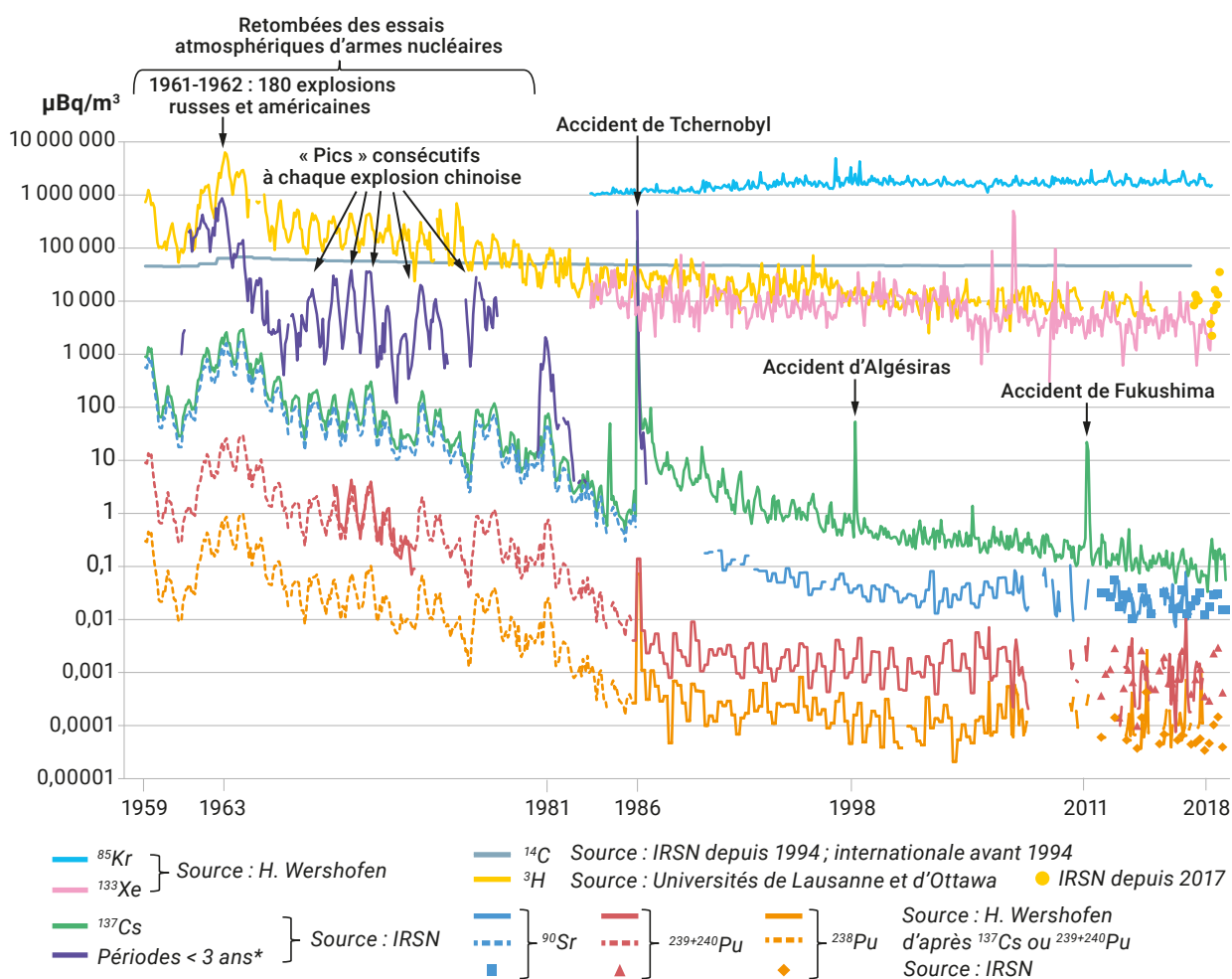


FIGURE 18 / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS MESURÉS DANS L'AIR EN FRANCE ET EN ALLEMAGNE AU COURS DES 60 DERNIÈRES ANNÉES ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)

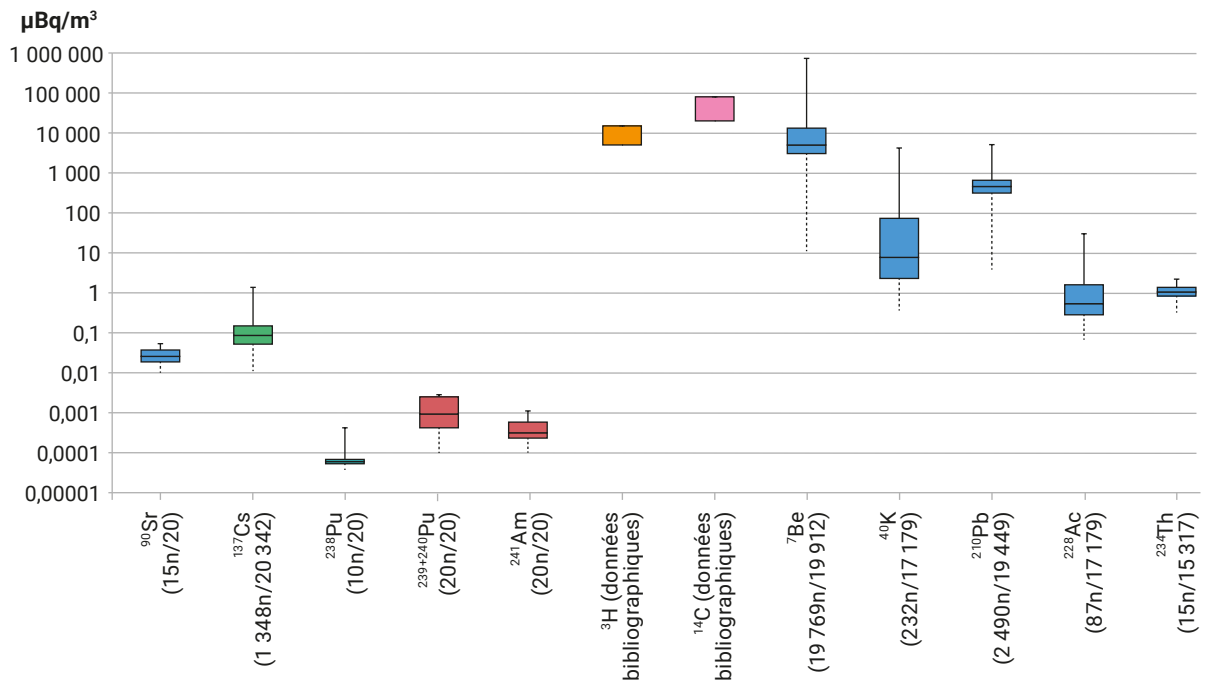
La figure 18 présente des données acquises en France par l'IRSN et en Allemagne par le Physikalisch-Technische Bundesanstalt (source H. Verschofen). Pour les radionucléides issus des retombées des essais nucléaires, ces données allemandes sont tout à fait représentatives du bruit de fond radiologique français ; les données de strontium-90 et de plutonium acquises par l'IRSN depuis 2012 montrent notamment une bonne concordance avec les données allemandes. Le krypton-85 mesuré en France a quatre origines : naturelle (très faible), les essais d'armes nucléaires, les accidents de Tchernobyl et de Fukushima et l'ensemble des rejets des usines de retraitement du combustible mondiales. Les activités de krypton-85 mesurées en Allemagne peuvent être considérées comme représentatives du bruit de fond radiologique français. En France, l'influence spécifique des rejets de l'usine de La Hague vient s'ajouter à ce bruit de fond (cf. chapitre 3.3 La Hague). Le xénon-133 a été émis lors des essais d'armes nucléaires, lors des accidents de Tchernobyl et de Fukushima et il est rejeté par de nombreuses installations nucléaires, notamment les CNPE. Toutefois, sa principale origine s'explique par les rejets de l'industrie radio-pharmaceutique. Ainsi, le xénon-133 présent dans l'air en France et en Allemagne provient principalement de l'Institut national des radioéléments (IRE) installé à Fleurus en Belgique. Pour tous les radionucléides, les valeurs présentées sont des moyennes mensuelles pour la France entière. Ces moyennes ne rendent pas compte des valeurs atteintes ponctuellement. Ainsi, le 1^{er} mai 1986 après l'accident de Tchernobyl, l'activité en césium-137 de l'air a atteint $7 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ($7\,000\,000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) à Verdun. De même, l'activité de césium-137 mesurée sur la station de La Seyne-sur-Mer suite à l'incinération accidentelle d'une source de césium-137 le 25 mai 1998 à Algesiras en Espagne, a été de $2\,480 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ début juin. Enfin les activités maximales en radionucléides de période inférieure à 3 ans (^{131}I et ^{134}Cs notamment) ont approché ponctuellement $10\,000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (dont $7\,500 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'iode-131 gazeux et $2\,000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'iode-131 particulaire), et $250 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ de césium-137, entre le 25 mars et le 20 avril 2011 après l'accident de Fukushima. Les activités en plutonium-238 sont 30 fois inférieures à celles du plutonium-239+240. Elles résultent des essais d'armes nucléaires et aussi de la désintégration, dans l'atmosphère en 1964, d'un satellite (SNAP 4) dont l'énergie était fournie par ce radionucléide. Enfin, l'américium-241, descendant du plutonium-241 émis lors des essais nucléaires, n'est pas représenté dans ce graphique. Durant les deux dernières décennies, son activité dans l'air est de l'ordre de la moitié de celle du plutonium-239+240 comme l'indique la figure 19.



* 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 ...

FIGURE 19 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES MOYENNES DEPUIS 2009 DE QUELQUES RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS ET NATURELS MESURÉS DANS L'AIR EN FRANCE

La figure 19 présente les activités volumiques moyennes sur les 10 dernières années de quelques radionucléides artificiels et naturels mesurés par l'IRSN. Pour chaque radionucléide sont fournis le nombre de résultats exploités (supérieurs au seuil de décision) et le nombre d'analyses (exemple : 15/20).



FOCUS
**APPORT DES CONSTATS RADIOLOGIQUES
SUR LA CONNAISSANCE
DU BRUIT DE FOND EN MANCHE
ET EN MÉDITERRANÉE**

En complément de la surveillance régulière exercée par l'IRSN sur le littoral métropolitain, le constat radiologique Méditerranée et le volet aquatique marin du constat Normandie et Hauts-de-France, (cf. focus du chapitre 1) ont permis de renforcer la connaissance sur le bruit de fond en milieu marin dans ces deux ensembles géographiques. La démarche des

constats radiologiques avait en effet pour objectif d'établir, sur un territoire étendu, un référentiel actualisé des niveaux de radioactivité dans les différentes composantes de l'environnement caractéristiques du territoire concerné. Ce référentiel devant rendre compte, d'une part, du « bruit de fond » radiologique lié à la radioactivité naturelle et à la rémanence des retombées atmosphériques anciennes (essais aériens d'armes nucléaires et accident de Tchernobyl) et, d'autre part, de l'influence des rejets actuels ou passés des installations nucléaires.

Stratégies d'échantillonnage et de mesures

Le Constat mer Méditerranée a concerné la zone côtière de la Méditerranée française, depuis la bordure des communes littorales jusqu'à la limite des eaux territoriales (12 milles nautiques), voire plus au large. L'accent a été mis sur la connaissance du milieu hauturier (haute mer) qui est une spécificité des constats par rapport à la surveillance régulière, principalement dédiée à la caractérisation de la zone littorale. Les données décrites dans ce constat ont été acquises par l'IRSN, entre le début des années 1990 et 2015.

Le volet aquatique marin du constat Normandie et Hauts-de-France couvre pour sa part le chenal de la Manche et la partie sud de la mer du Nord. Comme pour le constat Méditerranée, il se décline en deux environnements : le milieu marin littoral et le milieu marin hauturier. Le milieu littoral s'étend géographiquement des côtes bretonnes (Roscoff) jusqu'à la frontière Belge, et le milieu marin des côtes du comté de Cornouailles en Angleterre jusqu'aux côtes néerlandaises où l'Escaut se jette en mer du Nord. Compte tenu des contraintes liées à la réalisation des prélèvements en mer, l'IRSN a engagé dans le cadre de ces constats un certain nombre de partenariats notamment avec l'IFREMER pour avoir accès à des échantillons prélevés au large des côtes françaises.

L'établissement des constats passe en premier lieu par l'examen des données déjà disponibles, notamment celles acquises par l'IRSN et les différents acteurs du Réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement (RNM) dans le cadre de leur surveillance. Ces mesures sont ensuite complétées et actualisées par des prélèvements et des analyses spécifiques. Ces deux constats ont ainsi été l'occasion de prélever une large gamme d'échantillons (ou matrices) représentatifs de la faune (poissons, mollusques, crustacés) et dans une moindre mesure de la flore locale (les prélèvements d'algues ne sont pas possibles en Méditerranée car la flore naturelle y est essentiellement constituée d'espèces protégées) ainsi que des échantillons d'eau de mer et de sédiments.

Les échantillons prélevés ont fait l'objet d'une série d'analyses réalisées au moyen des meilleures techniques disponibles en vue de quantifier les niveaux des principaux radionucléides naturels et artificiels présents en quantité mesurable dans l'environnement. Pour les poissons et les mollusques, les mesures ont été réalisées sur la partie consommable des échantillons.

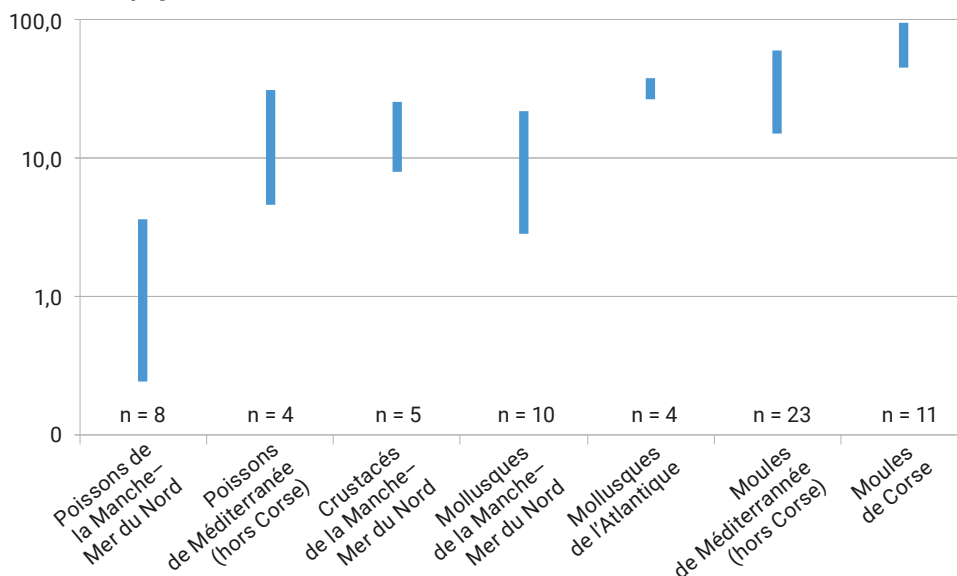
Bruit de fond des radionucléides telluriques en milieu marin

En milieu marin, les radionucléides naturels telluriques proviennent essentiellement du drainage des sols continentaux et du dégazage du radon. Les activités des isotopes de l'uranium mesurées dans les moules de Méditerranée et dans les sédiments prélevés en Manche et en mer du Nord sont caractéristiques de l'uranium naturel, avec des rapports massiques entre uranium-235 et uranium-238 proches de 0,72 g/100 g. Plus généralement, les gammes d'activité mesurées dans les sédiments témoignent de l'absence de perturbations dues aux activités humaines et du caractère naturel de ces sédiments. La variabilité spatiale étant liée à la géologie, les sédiments prélevés sur les plages présentent une activité naturelle généralement plus élevée que ceux prélevés plus au large. Pour les isotopes des chaînes de l'uranium-238 et du thorium-232, les valeurs varient entre moins de 10 Bq/kg sec en Manche et plus de 1 000 Bq/kg sec sur certaines plages de Camargue (« sables noirs »).

Le polonium-210, un des émetteurs alpha descendant de la chaîne de l'uranium-238, a la particularité de se concentrer dans certaines denrées marines, en raison de la forte assimilation de cet élément par le plancton, puis son transfert trophique. Les activités massiques sont particulièrement élevées dans les coquillages, les crustacés et les petits poissons (sardines, harengs, anchois), contribuant ainsi de façon très majoritaire à la dose par ingestion de radionucléides naturels reçue par les personnes qui en consomment très régulièrement. Les activités mesurées (figure 1) vont de 0,2 Bq/kg frais pour les poissons pêchés au large dans le cadre du constat Normandie et Hauts-de-France à plus de 80 Bq/kg frais pour des moules implantées en Corse. Les résultats des deux constats confirment ainsi la bibliographie internationale, en particulier la variabilité entre espèces (activités plus élevées dans les moules et crevettes que dans les poissons, du fait du comportement de l'élément) et la variabilité spatiale dépendante de la nature géologique des côtes (activités plus élevées en descendants de l'uranium-238 le long de la côte rocheuse cristalline Corse).

FIGURE 1 / VARIABILITÉ (min, max) DES ACTIVITÉS MASSIQUES (Bq/kg frais) EN POLONIUM-210 DANS DES ÉCHANTILLONS DE POISSONS (merlan, rouget...), DE CRUSTACÉS (crabe, crevettes) ET DE MOLLUSQUES (moules, huîtres, patelles...); « n » REPRÉSENTE LE NOMBRE DE RÉSULTATS DE MESURE EXPLOITÉS

Activité en Bq/kg frais



Bruit de fond du carbone-14 et du tritium en milieu marin

Le bruit de fond de ces deux radionucléides en milieu marin côtier peut être influencé par les rejets des installations nucléaires. Cette influence sera particulièrement marquée en Manche et en mer du Nord en raison des rejets de l'usine de retraitement de La Hague.

En dehors de cette influence, les résultats acquis ces dernières années par l'IRSN confirment que les activités de carbone-14 par unité de masse de carbone en milieu marin sont très proches de celles mesurées en milieu terrestre, quoique légèrement supérieures et plus variables (cf. focus « Le bruit de fond du tritium et du carbone-14 » pp. 61-66). Ainsi, les activités de carbone-14 par unité de masse de carbone mesurées dans les moules de Méditerranée dans le cadre du constat sont représentatives du bruit de fond de ce radionucléide en milieu marin.

Le constat Normandie et Hauts-de-France a été l'occasion, en s'éloignant des côtes et de l'influence des rejets de l'usine de La Hague, de réaliser une première cartographie du bruit de fond en carbone-14 dans les poissons et les céphalopodes. On constate que les échantillons prélevés autour de la presqu'île du Cotentin présentent quasiment tous des activités de carbone-14 par unité de masse de carbone supérieures à 300 Bq/kg de carbone ce qui les distingue des autres prélèvements compris entre $242,6 \pm 2,8$ Bq/kg de carbone pour le prélèvement réalisé au large des côtes bretonnes et $295,1 \pm 3,3$ Bq/kg de carbone pour le prélèvement au niveau de Boulogne-sur-Mer.

Les niveaux d'activité en tritium organiquement lié (TOL) mesurés sur les prélèvements de salicornes et de petits crustacés (crevettes, crabes) prélevés dans le cadre du constat Normandie et Hauts-de-France ne font pas apparaître de niveaux plus élevés que le bruit de fond mesuré habituellement sur les côtes de la Manche hors influence directe des rejets de l'usine de La Hague (entre 2 et 5 Bq/L d'eau de combustion). Les résultats des mesures de TOL sur les poissons sont assez homogènes sur l'ensemble de la zone et, en dehors des prélèvements réalisés au niveau de la pointe de la Bretagne ou en mer du Nord où les niveaux sont plus bas ($0,6 \pm 0,1$ Bq/L d'eau de combustion), compris entre 1,3 et 4,8 Bq/L d'eau de combustion. Par ailleurs, les données nouvellement acquises sur les céphalopodes (encornets), montrent que les activités sont sensiblement les mêmes que dans les poissons et comprises entre 2 et 5,1 Bq/L d'eau de combustion pour le prélèvement réalisé au niveau de la pointe du Cotentin.

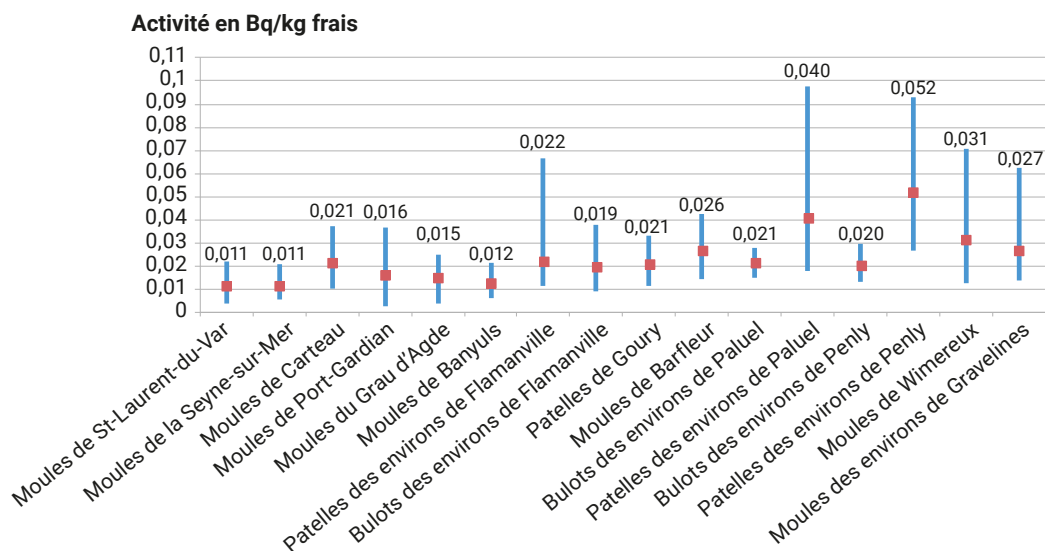
En Méditerranée, les activités de tritium libre dans l'eau de mer sont de l'ordre de 0,1 Bq/L et relèvent du bruit de fond ; les activités de tritium lié (TOL) dans les sédiments marins superficiels de Méditerranée sont dans une gamme comprise entre 0,5 et 1,5 Bq/kg sec et autour de 1 Bq/L d'eau de combustion dans les moules et les poissons, ce qui correspond à environ 0,1 à 0,3 Bq/kg frais. L'influence du Rhône dont les eaux sont marquées par les rejets des installations nucléaires rhodaniennes (cf. chapitre 3.1) est perceptible uniquement à l'embouchure du fleuve pour le tritium lié à la matière organique dans les sédiments et la faune, et sur tout le littoral situé à l'ouest de l'embouchure pour le tritium libre dans l'eau de mer. Dans la zone d'influence des apports du Rhône à la mer, les niveaux de tritium dans les eaux côtières peuvent être deux à vingt fois supérieurs aux niveaux hors influence.

Bruit de fond en césium-137 et des autres produits de fission et d'activation en milieu marin

Le césium-137 en milieu marin se comporte comme un élément soluble et présente des capacités de fixation assez faibles. Il demeure toutefois l'un des seuls radionucléides artificiels encore mesurable dans les eaux de surface océaniques, en suivant un protocole spécifique pour abaisser les seuils de décision par une méthode de concentration. Hors influence des rejets liquides des installations nucléaires, il a pour principale origine le drainage des sols marqués par les retombées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, et parvient en mer par les fleuves et par lessivage des sols côtiers. C'est le cas notamment des apports du Rhône en Méditerranée depuis la baisse des rejets des installations nucléaires au cours des années 1990-2000.

Les niveaux de césium-137 relevant de ce bruit de fond sont de l'ordre de 0,7 à 2 mBq/L dans l'eau de mer, de 0,1 à 2 Bq/kg sec (0,02 à 0,3 Bq/kg frais) dans les algues et les coquillages (figure 2) et de 0,02 à 1,4 Bq/kg frais dans les poissons. Dans les sédiments, les activités en césium-137 vont de 0,1 à 15 Bq/kg sec. De même, avec la diminution des activités rejetées par l'usine de La Hague, les niveaux de césium-137 en Manche sont très proches du bruit de fond hérité des retombées anciennes. C'est le cas notamment des échantillons de sédiments marins, de poissons et d'encornets prélevés au large des côtes françaises dans le cadre du constat Normandie et Hauts-de-France. Ainsi, dans les poissons, les valeurs vont de 0,05 à 0,1 Bq/kg frais et les mesures effectuées sur les encornets sont dans leur grande majorité inférieures aux seuils de décisions sauf pour un prélèvement ($0,04 \pm 0,02$ Bq/kg frais).

FIGURE 2 / VARIABILITÉ (min, max, moy) DES ACTIVITÉS MASSIQUES EN CÉSIIUM-137 DANS LES MOLLUSQUES DE MÉDITERRANÉE, DE MANCHE ET DE MER DU NORD





Malgré une forte capacité de dilution du milieu, la liste des radionucléides artificiels potentiellement détectables en Manche est, compte tenu des activités rejetées en mer notamment par l'usine de La Hague, plus importante qu'en Méditerranée. Toutefois, à partir des années 1990, les niveaux d'activité en cobalt-60 ont considérablement diminué avec la baisse des activités dans les rejets et sont maintenant proches du bruit de fond. Les activités mesurées sur les prélèvements de sédiments réalisés au niveau de la presqu'île du Cotentin sont comprises entre 0,29 et 1,2 Bq/kg sec et ne sont plus quantifiables dès lors qu'on s'éloigne de l'influence des rejets de La Hague. Ainsi, aucune valeur significative n'a pu être mesurée dans les échantillons de faune (mollusques, crustacés, poissons) et de flore marine (salicornes, algues) prélevés dans le cadre du constat.

En mer Méditerranée, une influence des rejets des installations nucléaires rhodaniennes est décelée dans les sédiments à l'embouchure du fleuve. À distance de l'estuaire du Rhône, les activités en cobalt-60 sont le plus souvent trop faibles pour être quantifiées par les mesures de spectrométrie gamma bas niveau mises en œuvre, quelle que soit la matrice prélevée. À proximité de son embouchure, les activités en cobalt-60 dans les moules et les poissons peuvent atteindre, localement et sporadiquement, des valeurs allant de moins de 0,01 Bq/kg frais à 0,03 Bq/kg frais.

Afin de compléter les données existantes, des analyses d'iode-129 et de strontium-90 ont été effectuées sur les échantillons marins littoraux et offshore prélevés dans le cadre du constat Normandie et Hauts-de-France ; seul l'échantillon d'algues brunes prélevé en baie de Seine présente une activité significative en iode-129 ($1,3 \pm 0,3$ Bq/kg frais), témoin de la diminution des activités rejetées par l'usine de La Hague. De la même manière pour le strontium-90, les résultats acquis dans le cadre du constat ne font pas apparaître de point particulier. Seules quelques valeurs légèrement supérieures aux seuils de décisions ont pu être relevées sur les sédiments et les échantillons de faune prélevés à proximité de l'usine de La Hague.

Bruit de fond du plutonium en milieu marin

Comme le césium-137 et le strontium-90, le plutonium présent en milieu marin provient du milieu terrestre et notamment du drainage des sols, diffus sur le littoral et *via* les fleuves côtiers. Cet apport est essentiellement particulaire et la faible solubilité du plutonium en milieu marin fait qu'il restera essentiellement particulaire. Dans les sédiments de mer Méditerranée situés à proximité de l'embouchure du Rhône, le plutonium provenant des rejets de l'usine de Marcoule ne se distingue de celui provenant des retombées des essais nucléaires que par les rapports d'activités isotopiques (cf. paragraphe 2.2 « cas des isotopes du plutonium et de l'américium-241 »).

En Manche et en Mer du Nord, l'influence des rejets passés et actuels de l'usine de retraitement de La Hague sur les échantillons prélevés sur le littoral se distingue facilement des niveaux d'activité mesurés sur les côtes de la Méditerranée ou de l'Atlantique. Les valeurs mesurées sur les produits issus de la pêche à pied et les coquilles Saint-Jacques dans le cadre du constat ne font toutefois pas apparaître de point particulier et confirment les niveaux attendus. Il en va de même pour les résultats acquis sur les échantillons de sédiments et de poissons prélevés au large des côtes avec une tendance à la baisse des activités mesurées qui, bien que toujours décelables au niveau de la presqu'île du Cotentin, devient de plus en plus difficile à mesurer dès lors qu'on s'en éloigne.

2.4. GAMME DES DOSES À LA POPULATION, LIÉES AU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS

Les différents éléments fournis ci-après, relatifs aux doses efficaces reçues par la population française et dues aux sources naturelles de rayonnement ou à la rémanence des retombées anciennes, sont principalement issus du rapport IRSN/2021-00108 « Exposition de la population française aux rayonnements ionisants » téléchargeable à partir du site Internet de l'IRSN.

Doses efficaces externes liées aux rayonnements cosmique et tellurique

Sur la base de la carte de France du rayonnement cosmique (figure 1 p. 45), en considérant d'une part qu'une personne passe l'essentiel de son temps à l'intérieur de constructions (22 h/j en moyenne et 16 h/j pour un travail en extérieur) et que d'autre part, la construction atténue de 20 % ce rayonnement, la dose efficace moyenne reçue par un adulte et due au rayonnement cosmique est évaluée à 0,31 mSv/an. Pour 95 % des personnes elle est inférieure à 0,35 mSv/an mais peut atteindre 1,1 mSv/an pour les communes situées en altitude. Ainsi, pour la majeure partie de la population, l'exposition au rayonnement cosmique est peu variable si l'on excepte les communes d'altitude et les expositions lors des trajets aériens. En effet, les personnes amenées à voyager en avion sont soumises à des expositions supplémentaires. Compte tenu du faible nombre moyen de trajets par habitant, cette exposition supplémentaire est de seulement 0,014 mSv/an en moyenne pour l'ensemble de la population, mais elle est de 0,28 mSv/an en moyenne pour les voyageurs effectuant dix vols aller-retour par an⁽⁴⁾ et de 0,84 mSv/an pour ceux effectuant 30 vols aller-retour par an.

L'exposition de la population aux rayonnements telluriques dépend du sous-sol et des matériaux utilisés. De manière pénalisante, on considère que les matériaux de construction participent au débit de dose à l'intérieur des habitations en ajoutant 40 % du débit de dose mesuré à l'extérieur. Les données de mesures utilisées proviennent de dosimètres témoins placés dans 17 404 établissements dentaires et vétérinaires répartis sur le territoire (cf. chapitre 2.1). Sur la base de ces résultats et après déduction de la contribution due au rayonnement cosmique, la dose efficace moyenne pour un adulte due au rayonnement tellurique est de 0,63 mSv/an, la majeure partie de la population (90 %) recevant une

dose comprise entre 0,36 et 1,1 mSv/an. Cette dose peut atteindre 2 mSv/an dans certaines communes.

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

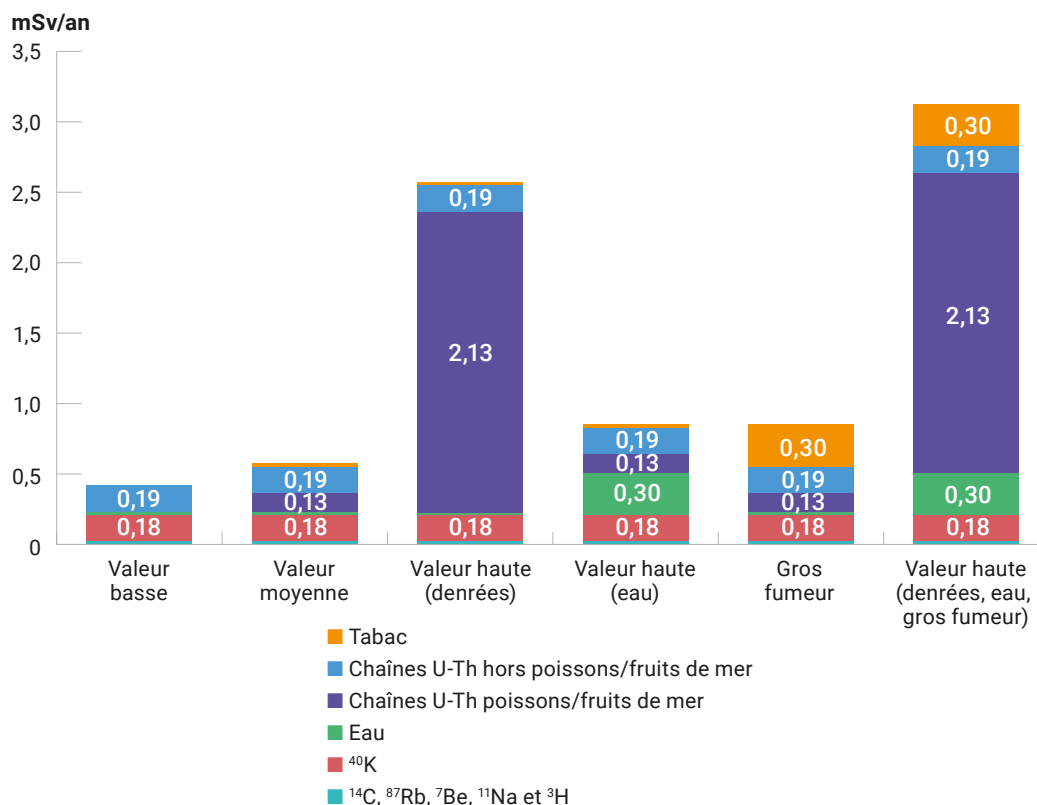
La dose efficace moyenne pour un adulte liée à l'incorporation de radionucléides naturels (cosmogéniques et telluriques) due à l'ingestion de denrées et au tabagisme est estimée à 0,55 mSv/an. Cette dose ne varie pas en fonction de la région mais des habitudes de consommation de chacun, en particulier de poissons/fruits de mer, dans une gamme allant de 0,4 mSv/an pour les personnes ne consommant pas ces produits et jusqu'à plus de 3,1 mSv/an pour celles en consommant de façon importante (figure 20). Bien que le potassium-40 représente une part importante (30 %) de cette dose, cette part varie très peu d'un individu à l'autre et ne dépend pas des habitudes alimentaires, le potassium étant régulé par l'organisme (kaliémie). Par ailleurs, les radionucléides cosmogéniques sont de faibles contributeurs (0,02 mSv/an soit moins de 4 %). La dose efficace moyenne liée aux descendants des chaînes de l'uranium et du thorium présents dans les denrées alimentaires est de 0,32 mSv/an, ce qui représente près de 60 % de la dose totale due à l'ingestion de denrées. Elle est extrêmement variable car liée à la consommation de poissons et surtout de coquillages et de crustacés qui présentent des teneurs élevées en ²¹⁰Po. Par rapport à une personne qui ne consomme jamais ces produits, une consommation très régulière de coquillages et de crustacés (1 à 2 fois par semaine), conduit à une dose efficace supplémentaire de 0,54 mSv/an, doublant ainsi la dose totale moyenne due à l'ingestion de denrées. De même, un gros fumeur peut recevoir une dose efficace supplémentaire de l'ordre de 0,3 mSv/an par rapport à un non-fumeur, en raison principalement de la teneur en ²¹⁰Po du tabac.

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

(4) Il s'agit d'une estimation faite à partir de la durée moyenne des vols au départ de la France et en considérant le temps de présence aux différentes altitudes où les débits de doses sont différents.

FIGURE 20 / SYNTHÈSE DES DOSES (exprimées en mSv/an) DUES À L'INCORPORATION PAR UN ADULTE DE RADIONUCLÉIDES NATURELS

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



Dose efficace liée à l'inhalation de radon

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

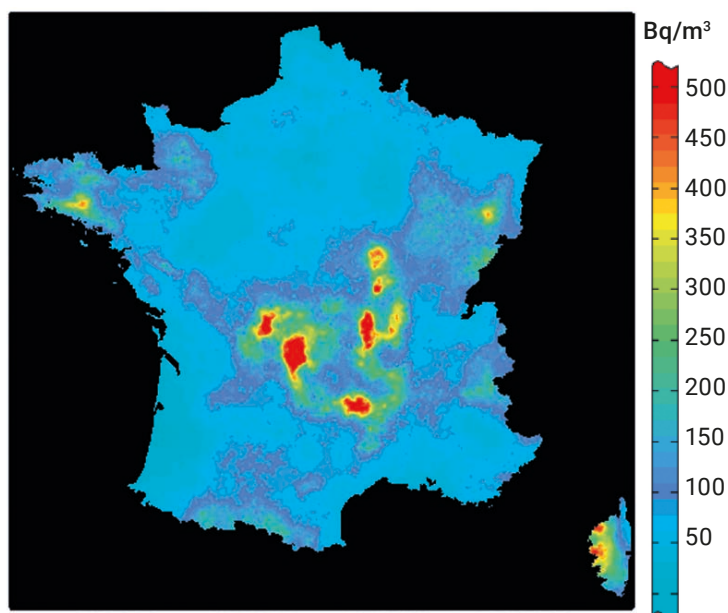
La concentration moyenne en radon-222 à l'intérieur de l'habitat en France métropolitaine, pondérée par la population et le type d'habitat, est de 60 Bq/m³. La dose moyenne correspondante est estimée à 1,45 mSv/an. La carte des activités volumiques potentielles de radon à l'intérieur des habitations (figure 21) montre une situation extrêmement contrastée entre une majeure partie de la France où les activités

sont inférieures à 150 Bq/m³ et quelques zones du Massif central, des Vosges, d'Armorique et de l'ouest de la Corse où les activités dépassent 400 Bq/m³. Ainsi, si 90 % de la population française reçoit une dose efficace due au radon comprise entre 0,54 et 3,2 mSv/an, les habitants de certaines communes peuvent recevoir des doses supérieures à 10 mSv/an. Enfin, il faut signaler le cas d'habitations construites sur des résidus miniers où les activités en radon dans l'air peuvent atteindre plusieurs milliers de Bq/m³ avec des doses correspondantes d'autant plus élevées.

Ces estimations sont proches de celles du précédent *Bilan radiologique*. Il faut toutefois signaler qu'en conséquence d'une recommandation de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), la valeur du facteur de conversion de dose du radon (facteur qui détermine la relation entre la dose et l'activité de radon inhalée), pourrait être quasiment doublée, entraînant le doublement des doses présentées dans le présent bilan.

FIGURE 21 / ACTIVITÉ VOLUMIQUE POTENTIELLE DU RADON À L'INTÉRIEUR DES HABITATIONS DÉDUITE DE LA NATURE DES ROCHES QUI COMPOSENT LE SOUS-SOL (Bq/m³)

Les concentrations les plus élevées, supérieures à 400 Bq/m³, sont observées sur les massifs anciens (armoricain, central, Vosges et côte nord-occidentale de la Corse), les valeurs les plus faibles, inférieures à 100 Bq/m³, sur les bassins sédimentaires (parisien et aquitain).



Doses efficaces liées à la rémanence des retombées anciennes de radionucléides artificiels

L'exposition actuelle de la population française à la rémanence des retombées des essais d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, a été récemment réévaluée par l'IRSN (cf. rapport IRSN/2021-00108).

L'exposition à la rémanence des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires est principalement liée à l'incorporation de strontium-90 et de carbone-14 par ingestion de denrées. La dose efficace due à l'incorporation de strontium-90 par un adulte est estimée à 1,3 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Celle résultant de l'incorporation de carbone-14 hérité des essais nucléaires ne représente que quelques pourcents de la dose due au carbone-14 d'origine naturelle ; une valeur majorante de 1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ a été retenue. Les doses liées à l'incorporation de tritium et d'actinides (isotopes du plutonium et américium-241) sont, en regard, insignifiantes pour le tritium et négligeables pour les actinides (très inférieure à 0,01 $\mu\text{Sv}/\text{an}$). Bien que l'on dispose de cartographies des activités de césium-137 déposées à l'issue des essais nucléaires d'une part et lors de l'accident de Tchernobyl d'autre part, il est difficile aujourd'hui de déterminer précisément les contributions respectives de ces deux origines aux expositions liées aux activités de césium-137 présentes dans les sols (notamment aux débits de doses mesurés) et dans les denrées. C'est pourquoi, les expositions liées au césium-137 provenant des deux origines sont estimées globalement ci-après. La dose efficace totale par ingestion de césium-137 est ainsi estimée à 1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (soit 0,001 mSv/an) pour des adultes résidant hors des zones de rémanence élevées des retombées anciennes (ZRE, cf. focus pp 69-71) et à 4,0 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (soit 0,004 mSv/an) pour des adultes résidant en ZRE. Les denrées naturelles comme les champignons et les gibiers présentant des concentrations en césium-137 très supérieures à celles des denrées issues de l'agriculture et de l'élevage, elles peuvent contribuer à plus de 50 % de la dose liée à l'incorporation de césium-137 par ingestion de denrées. Une forte consommation de ces denrées peut conduire à des doses encore nettement supérieures. Ainsi, une personne qui prendrait deux fois par mois un repas composé de 200 g de gibier et 100 g de champignons présentant les teneurs en césium-137 les plus élevées mesurées en France, recevrait une dose de 80 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (soit 0,08 mSv/an). Cette dose pourrait atteindre 500 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (soit 0,50 mSv/an) pour un très gros consommateur de ces denrées qui prendrait deux repas de ce type par semaine (cf. cas D du focus p. 89).

Les expositions liées au rayonnement du césium-137 présent dans les sols prédominent sur toutes les expositions aux retombées anciennes présentées précédemment. Ainsi, les estimations de doses efficaces externes montrent que hors ZRE, la population est exposée entre 3 et 6 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (soit entre 0,003 et 0,006 mSv/an) ; pour la population résidant en ZRE, les doses efficaces externes dues au césium-137 sont estimées entre 10 et 40 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (soit entre 0,01 et 0,04 mSv/an).

Bilan des doses efficaces liées au bruit de fond radiologique français

L'exposition moyenne de la population française au bruit de fond radiologique, tel que défini précédemment, est estimée à 3 mSv/an. Cette dose varie de manière importante autour de cette valeur moyenne en fonction du lieu de résidence (accumulation de radon dans l'air, rayonnement tellurique) et du mode de vie (consommation de fruits de mer, tabagisme, voyages en avion).

Pour illustrer cette variabilité, l'IRSN a défini pour son récent bilan sur l'exposition de la population française aux rayonnements ionisants (cf. rapport IRSN/2021-00108) une dizaine des situations types d'exposition. Trois de ces situations sont présentées à titre d'illustration dans le focus de la page 83. À noter que dans ce bilan, l'exposition liée aux examens médicaux utilisant des sources de rayonnements est aussi prise en compte.

Enfin, il faut noter que la prise en compte du nouveau coefficient de dose pour le radon proposé par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), pourrait entraîner une augmentation de la dose efficace moyenne annuelle due au bruit de fond radiologique environnementale français, estimée par l'IRSN, qui passerait de 3 mSv/an à 5 mSv par an.

FOCUS ACTUALISATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION FRANÇAISE AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

En 2021, l'IRSN a effectué une mise à jour de son bilan de l'exposition de la population française aux rayonnements ionisants (cf. rapport IRSN/2021-00108). Outre l'exposition au bruit de fond radiologique environnemental détaillée dans le présent rapport, ce bilan prend aussi en compte l'exposition liée à des actes

de diagnostic médical utilisant des sources de rayonnements⁽¹⁾.

Cette mise à jour de la précédente édition datant de 2015, a consisté à actualiser les données utilisées pour les évaluations. Il s'agit notamment des données relatives à la structure de la population française (nombre d'habitants par commune, nombre de personnes par classe d'âge, prise en compte des regroupements administratifs de communes...) susceptibles d'influencer le calcul de la dose moyenne par habitant, des données relatives aux actes de radiodiagnostic médical fournies en 2017 par la caisse primaire d'assurance maladie (CPAM), ainsi que des données relatives au transport aérien en 2018. Enfin, les estimations dosimétriques liées d'une part aux radionucléides présents dans l'environnement et hérités des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, et d'autre part aux radionucléides présents dans les rejets autorisés des installations nucléaires, ont été précisées.

Malgré ces mises à jour, la dose efficace moyenne par habitant serait restée globalement inchangée, autour de 4,5 mSv par an.

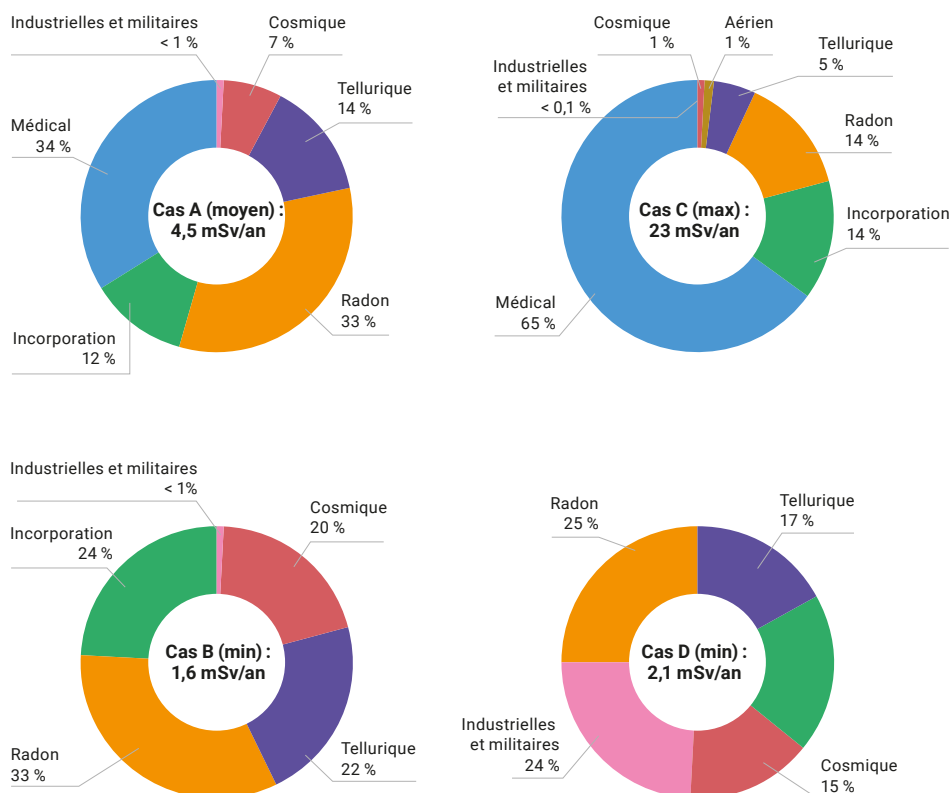
L'exposition médicale à visée diagnostique et l'exposition au radon constituent toujours les deux sources principales de cette exposition en contribuant chacune à près d'un tiers de la dose totale (cas A de la figure 1). Viennent ensuite les expositions liées au rayonnement tellurique (14 %), à l'incorporation de radionucléides naturels (12 %), au rayonnement cosmique (7 %), et enfin l'exposition à la rémanence des retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl. L'exposition de la population due aux activités nucléaires autorisées se caractérise par une dose efficace extrêmement faible, de l'ordre de 1 à 10 μ Sv (soit 0,001 à 0,01 mSv/an) dans un rayon d'une dizaine de kilomètres autour des sites nucléaires, inférieure au-delà. Ramenée à la population de l'ensemble du territoire la dose moyenne résultant de ces activités industrielles est de 0,11 μ Sv/an (0,00011 mSv/an).

Au-delà de cette exposition moyenne par habitant, les situations d'exposition de chacun d'entre nous peuvent fortement varier en fonction du lieu d'habitation (qui peut avoir une influence sur les rayonnements cosmique et tellurique ou les teneurs en radon dans les habitations), des habitudes de vie et de consommation (temps passé à l'intérieur des habitations, régime alimentaire, consommation de tabac, nombre de voyages en transport aérien) et des examens médicaux dont nous bénéficions.

C'est pourquoi un ensemble de 10 situations types d'exposition a été défini de manière à illustrer la variabilité autour de cette valeur moyenne. Trois de ces situations types sont présentées dans la figure 1 : la situation conduisant à l'exposition la plus faible (cas B), celle conduisant à la dose la plus élevée (cas C), ainsi qu'une situation très spécifique dans laquelle la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl induit une contribution non négligeable (cas D).

(1) S'agissant des actes thérapeutiques de radiothérapie, les expositions liées, ou associées, correspondent à des fortes doses, délivrées localement pour soigner les pathologies concernées. Les patients ainsi traités constituent une fraction relativement peu nombreuse de la population générale et sont exposés dans un cadre très particulier. C'est pourquoi leur exposition n'est pas prise en compte dans le cadre de ce bilan.

FIGURE 1 / DOSES EFFICACES TOTALES ET CONTRIBUTIONS DES DIFFÉRENTES VOIES D'EXPOSITION POUR UN ADULTE VIVANT EN FRANCE MÉTROPOLITAINE ET POUR DIFFÉRENTES SITUATIONS D'EXPOSITION



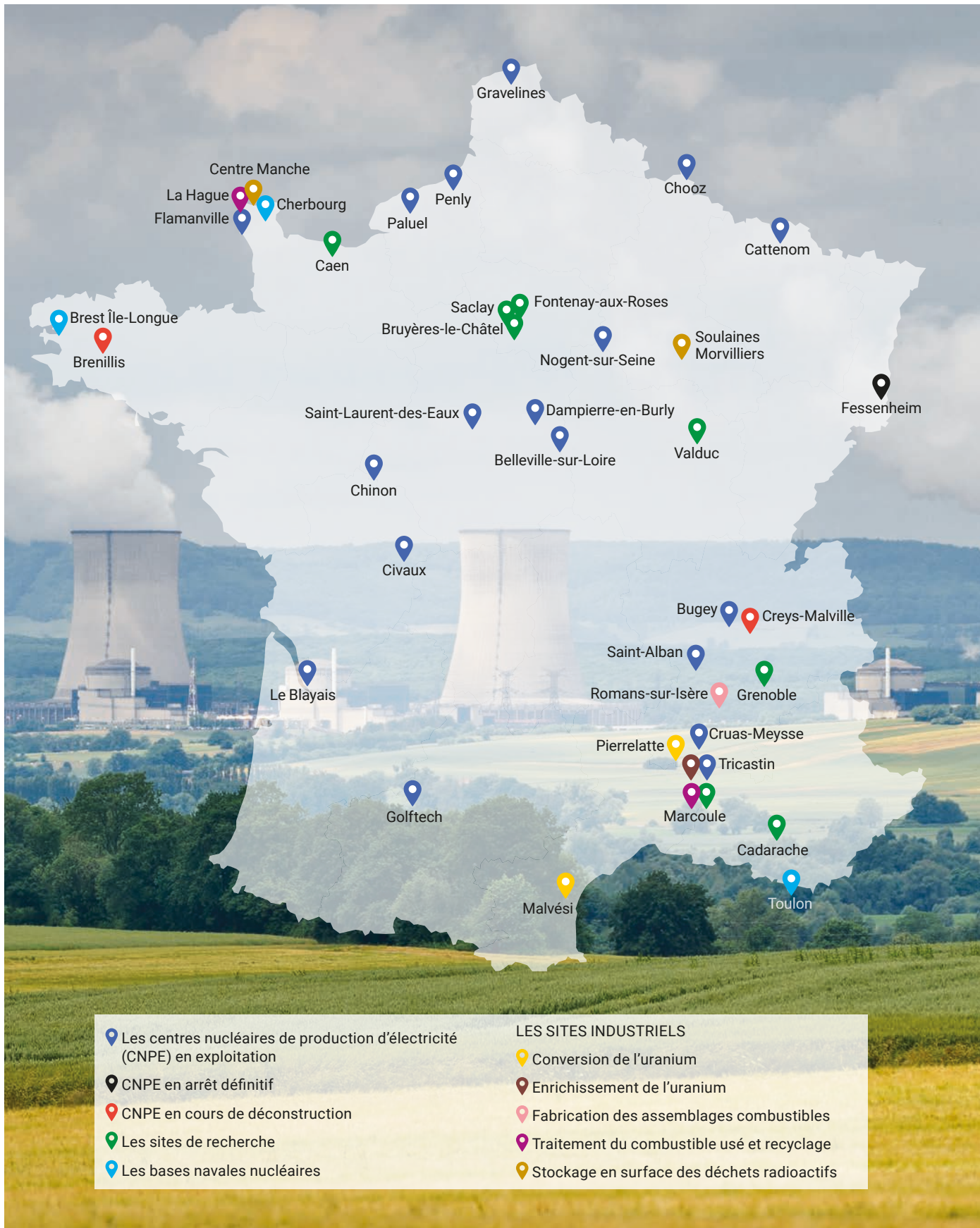
Le cas B correspond à une personne n'ayant bénéficié d'aucun examen médical, vivant dans une commune à faible concentration en radon et à faible niveau de rayonnements telluriques, et consommant peu de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels. Cette situation conduit à une dose de 1,6 mSv/an.

Le cas C correspond à la personne la plus exposée, c'est-à-dire ayant une exposition médicale importante, vivant dans une commune à forte concentration en radon et niveau élevé de rayonnements telluriques, fumant beaucoup, ayant une consommation importante de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et voyageant fréquemment en avion. Cette situation conduit à une dose de 23 mSv/an.

Enfin le cas D, reprend celui de la personne la moins exposée (cas B) mais consommant très fréquemment du gibier et des champignons présentant les teneurs en césium-137 dues aux retombées de l'accident de Tchernobyl les plus élevées mesurées en France ces dernières années. Cette situation conduit à une dose totale de 2,1 mSv/an, proche de la dose la plus faible (cas B) mais dans laquelle l'ingestion de ces aliments contaminés en césium-137 contribue à 24 % de la dose totale.

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/>).

Carte de localisation des sites nucléaires français avec en fond le CNPE de Cattenom.



03

DONNÉES RELATIVES AUX DIFFÉRENTS SITES NUCLÉAIRES FRANÇAIS

3.1. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ (CNPE) EN EXPLOITATION	92
Les rejets d'effluents radioactifs	93
Les plans de surveillance de l'environnement d'un CNPE	94
Influence des CNPE sur leur environnement et expositions du public associées	96
Influence des rejets d'effluents liquides tritiés	119
Influence des CNPE sur les activités de tritium dans les eaux de boisson et les eaux souterraines	126
Influence des rejets liquides d'autres radionucléides	128
Conclusion générale	132
3.2. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN COURS DE DÉCONSTRUCTION	134
Le site de Creys-Malville	134
Le site de Brennilis	141
3.3. LES SITES INDUSTRIELS	146
Le site de Malvési	146
Le site Orano du Tricastin	152
Le site de Romans-sur-Isère	160
Le site de La Hague	165
Le centre de stockage de l'Aube et le centre de stockage de Morvilliers	204
3.4. LES SITES DE RECHERCHE	210
Le site de Bruyère-le-Châtel	210
Le site de Cadarache	216
Le site du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds) à Caen	222
Le site CEA de Fontenay-aux-Roses	227
Centre CEA et Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble	233
Le site de Marcoule (Gard)	242
Le site de Saclay	255
Le site de Valduc	266
3.5. LES BASES NAVALES NUCLÉAIRES	278
Description	278
Les rejets radioactifs	279
La surveillance radiologique de l'environnement	280
Influence des sites sur l'environnement	283
3.6. SYNTHÈSE DOSIMÉTRIQUE	292

03

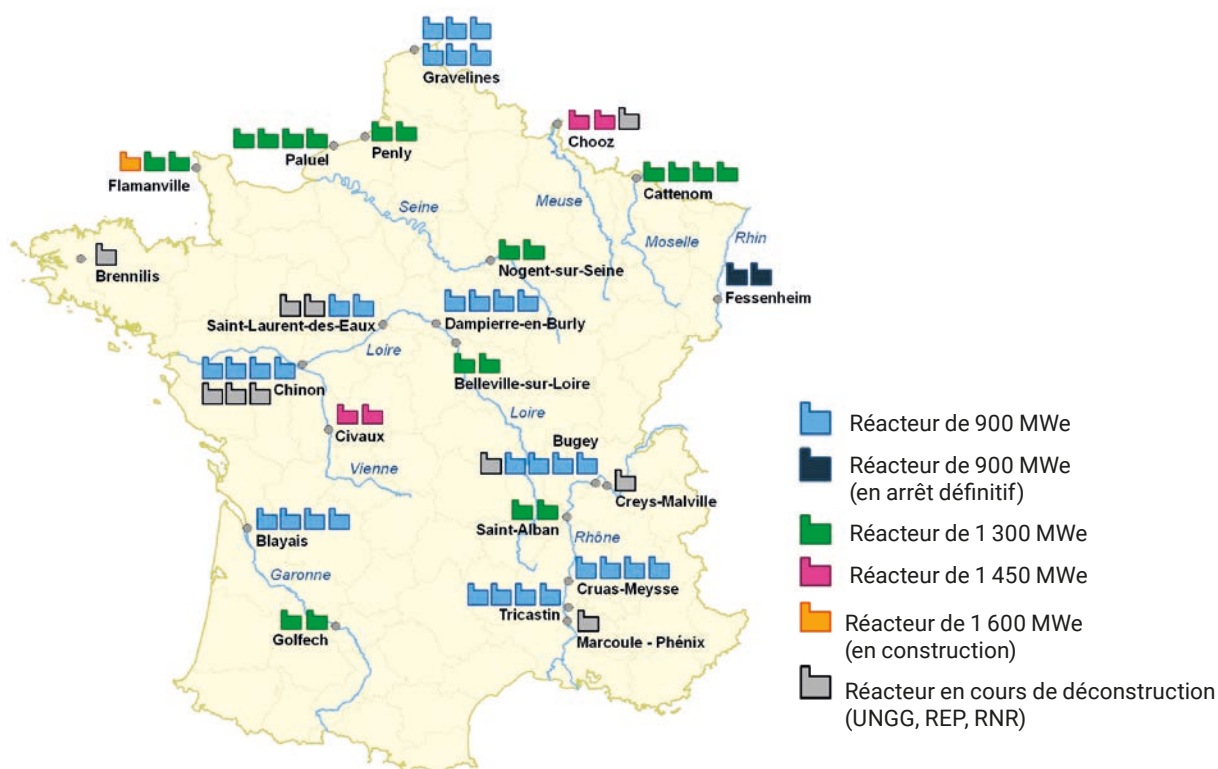
DONNÉES RELATIVES AUX DIFFÉRENTS SITES NUCLÉAIRES FRANÇAIS

3.1. 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 de la centrale 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 production : 32 réacteurs d'une puissance unitaire de 900 MWe, 20 réacteurs de 1 300 MWe et 4 réacteurs de 1 450 MWe (figure 1). Les résultats des mesures acquises dans l'environnement du CNPE de Fessenheim sont traités dans ce chapitre. 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 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 bord duquel il est implanté.

Les conditions de rejets 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 du présent *Bilan radiologique de l'environnement*, les gammes (minimum et maximum) des rejets 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, argon et surtout krypton, 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 (cf. tableaux 1 et 2).

TABLEAU 1 / GAMMES DES REJETS ANNUELS ATMOSPHÉRIQUES RÉELS (min. et max.) (GBq/an) POUR LA PÉRIODE 2017-2019 EN FONCTION DE LA PUISSANCE IMPLANTÉE SUR CHAQUE SITE

CNPE	Gaz rares	³ H	¹⁴ C	Iodes	PF/PA*
Gravelines	1 530 – 9 430	1 770 – 2 420	1 000 – 1 120	0,050 – 0,100	0,006 – 0,011
Cattenom, Paluel	500 – 2 260	1 700 – 3 540	570 – 850	0,034 – 0,160	0,007 – 0,008
Bugey, Cruas, Chinon, Dampierre, Tricastin, Blayais	440 – 4 840	590 – 1 520	440 – 890	0,014 – 0,067	0,002 – 0,006
Civaux, Chooz	500 – 2 010	620 – 1 580	170 – 260	0,016 – 0,107	0,001 – 0,007
Belleville, Flamanville, Golfech, Nogent, Penly, St-Alban	370 – 8 130	670 – 1 590	180 – 630	0,008 – 0,121	0,001 – 0,027
Fessenheim, St-Laurent	110 – 770	590 – 880	120 – 350	0,007 – 0,011	0,001 – 0,002

* PF/PA : produits de fission/produits d'activation : cobalt-60, cobalt-58, argent-110m, césium-137... (cf. glossaire du chapitre 9).

TABLEAU 2 / GAMMES DES REJETS ANNUELS LIQUIDES RÉELS (min. et max.) (GBq/an) POUR LA PÉRIODE 2017-2019 EN FONCTION DE LA PUISSANCE DES RÉACTEURS IMPLANTÉS SUR CHAQUE SITE

CNPE	³ H	¹⁴ C	Iodes	PF/PA*
Gravelines	58 700 – 70 600	31,2 – 44,0	0,03 – 0,051	2,19 – 5,18
Cattenom, Paluel	56 200 – 117 000	24,5 – 46,2	0,009 – 0,027	0,68 – 2,27
Bugey, Cruas, Chinon, Dampierre, Tricastin, Blayais	34 700 – 56 800	11,9 – 61,0	0,01 – 0,04	0,31 – 1,52
Civaux, Chooz	37 100 – 70 000	16,9 – 31,3	0,002 – 0,01	0,16 – 0,79
Belleville, Flamanville, Golfech, Nogent, Penly, St-Alban	40 300 – 63 500	3,7 – 55,0	0,005 – 0,02	0,17 – 0,51
Fessenheim, St-Laurent	11 300 – 31 200	4,0 – 12,2	0,002 – 0,010	0,24 – 0,56

* PF/PA : produits de fission/produits d'activation : cobalt-60, cobalt-58, argent-110m, césium-137... (cf. glossaire du chapitre 9).

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 50 000 résultats de mesure autour de l'ensemble des CNPE.

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 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]

Compartment 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'activité bêta globale et spectrométrie gamma ⁽⁹⁾ si l'activité bêta globale est supérieure à 2 mBq/m ³	Détermination de l'activité alpha globale et spectrométrie gamma ⁽⁹⁾ si l'activité alpha globale est supérieure 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'activité bêta globale, tritium ⁽⁷⁾ , potassium (sites marins) ⁽⁶⁾	Détermination de l'activité alpha globale
Eaux de surface	Si rejets liquides	Contrôle des eaux de surface en aval des rejets	Horaire à mensuelle ⁽²⁾	Détermination de l'activité bêta globale, tritium ⁽⁷⁾ , potassium ⁽⁶⁾	Détermination de l'activité alpha globale
Eaux souterraines		Contrôle des eaux souterraines ⁽¹²⁾	Mensuelle à annuelle ⁽²⁾		Détermination de l'activité alpha globale
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.
- (2ter) Pour chaque installation, les prélèvements et paramètres sont adaptés et précisés dans la décision de l'Autorité de sûreté nucléaire fixant les prescriptions relatives aux modalités de rejets dans l'environnement des effluents.
- (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 autour de 30 000 résultats d'analyses 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 25 ans une surveillance annuelle d'expertise dite « radioécologique » autour de ses CNPE, elle-même complétée par des bilans radioécologiques décennaux, qui sont réalisés par l'IRSN et SUBATECH. L'utilisation de techniques métrologiques performantes et le recours à des indicateurs biologiques dans le cadre de cette surveillance complémentaire de la surveillance de routine permettent de caractériser des radionucléides (naturels et artificiels) supplémentaires dans les compartiments aquatiques et terrestres.

D'autres radionucléides peuvent être ponctuellement caractérisés, mais il est important de noter que les teneurs dans les denrées terrestres sont trop faibles pour être mesurées même au moyen des meilleures techniques disponibles, à l'exception du césium-137 rémanent, issu des retombées de l'accident de Tchernobyl et/ou de celles des essais atmosphériques d'armes nucléaires (cf. chapitre 2).

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 à l'atmosphère : cas du carbone-14

Le marquage de l'environnement autour des CNPE par leurs rejets atmosphériques de carbone-14 est faible mais cependant mesurable grâce à l'emploi des meilleures techniques analytiques.

Dans l'air, ce marquage a pu être quantifié de manière très précise au cours d'une campagne de mesures effectuée par l'IRSN à Cruas de mai 2015 à mai 2016. Durant cette campagne, à la clôture sud de ce site, soit à moins de 1 km de la cheminée sous les vents dominants, l'activité moyenne en ^{14}C de l'air a été comprise entre 0,04 Bq/m³ et 0,25 Bq/m³ pour une moyenne de 0,095 Bq/m³, 2 fois supérieure à celle du bruit de fond de ce radionucléide. Cependant, et même pour une personne qui résiderait toute l'année à cet emplacement, la dose par inhalation résultant de cette activité ajoutée de carbone-14 dans l'air est négligeable : de l'ordre de 0,001 $\mu\text{Sv/an}$.

TABLEAU 3-B / EXEMPLE DE PLAN-TYPE DE LA SURVEILLANCE RÉALISÉE PAR L'IRSN

Matrice	Fréquence	Analyse
Aérosols	Hebdomadaire	Gamma
Eau de pluie	Mensuel	^3H total
Légume feuille	Annuel	Gamma HTO TOL ^{14}C
Céréales	Annuel	Gamma
Lait	Semestriel	Gamma HTO
Eau douce	Prélèvement horaire avec aliquote 6 jours	HTO
Matières en suspension dans l'eau	Mensuel	Gamma
Poissons	Annuel	Gamma TOL ^{14}C

Ces résultats sont cohérents avec les estimations faites par l'exploitant sur la base des activités rejetées de ce radionucléide.

Cette campagne avait également montré qu'un tiers seulement des rejets atmosphériques de carbone-14 d'un CNPE se présente sous la forme de CO₂ 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 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 carbone-14 par unité de masse de carbone (Bq/kg de carbone). Il s'agit d'un indicateur très sensible à même de discerner de faibles influences locales (cf. chapitre 2). 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.

La figure 2B présente l'évolution en fonction de la distance au site, des activités de carbone-14 mesurées entre 2017 et 2020 dans des échantillons de différentes composantes du milieu terrestre autour des CNPE de Cattenom, Chooz et Gravelines. Dans un rayon de 2 km autour de ces sites où l'influence est potentiellement la plus élevée, l'activité de carbone-14 est en moyenne de 7 % supérieure au bruit de fond radiologique (BdF = 225 Bq/kg de C sur la période 2018-2020, cf. chapitre 2). Pour l'échantillon dont l'activité mesurée a été la plus élevée (276 Bq/kg de C.), cette activité est de 23 % supérieure au bruit de fond. Ces résultats sont très proches de ceux mentionnés dans le précédent *Bilan radiologique* et qui étaient relatifs aux sites de Cruas, Saint-Alban et Paluel (+ 8 % dans les 2 km autour du site et + 21 % pour l'activité la plus élevée mesurée) au cours de la période 2014-2016 (figure 2A). 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 très 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 548 résultats de mesure acquis entre 2017 et 2020. Comme pour les 6 sites présentés dans la figure 2B, 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 de 356 résultats de mesures acquis durant la période 2018-2020 autour de l'ensemble des 18 sites d'EDF⁽¹⁾, est de + 12 Bq/kg de C (soit BdF de 225 Bq/kg de C + 5 %). Cette valeur est très proche de celle de + 11 Bq/kg de C mentionnée dans le *Bilan radiologique* précédent et qui avait été calculée à partir des résultats acquis sur la période 2014-2016. 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 par unité de masse de carbone ajoutée établie sur la base de 373 résultats de mesures serait légèrement plus faible : + 10 Bq/kg de C, soit BdF + 4 %.

Si les teneurs en carbone-14 les plus élevées sont mesurées dans des échantillons prélevés dans les 2 premiers kilomètres, c'est également à ces faibles distances au site que l'on observe la plus grande variabilité des activités : de 221 à 311 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 est illustrée dans le cas du tritium dans le focus pp. 108-112.

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 + 0,35 Bq/kg frais pour une salade, + 0,75 Bq/kg frais dans un fruit ou du lait de vache, + 2,4 Bq/kg frais dans de la viande de bœuf et jusqu'à + 4,8 Bq/kg frais dans des céréales.

(1) Les activités plus élevées mesurées autour du site du Tricastin en raison de rejets d'installations autres que le CNPE n'ont pas été utilisées pour calculer cette moyenne car elles introduiraient un biais.

FIGURES 2A ET 2B / 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) MESURÉES ENTRE 2017 ET 2020 SOUS INFLUENCE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES DES CNPE DE CATTENOM, CHOOZ ET GRAVELINES, ET ENTRE 2014 ET 2016 SOUS INFLUENCE DES REJETS DES CNPE DE CRUAS, PALUEL ET SAINT-ALBAN/ SAINT-MAURICE

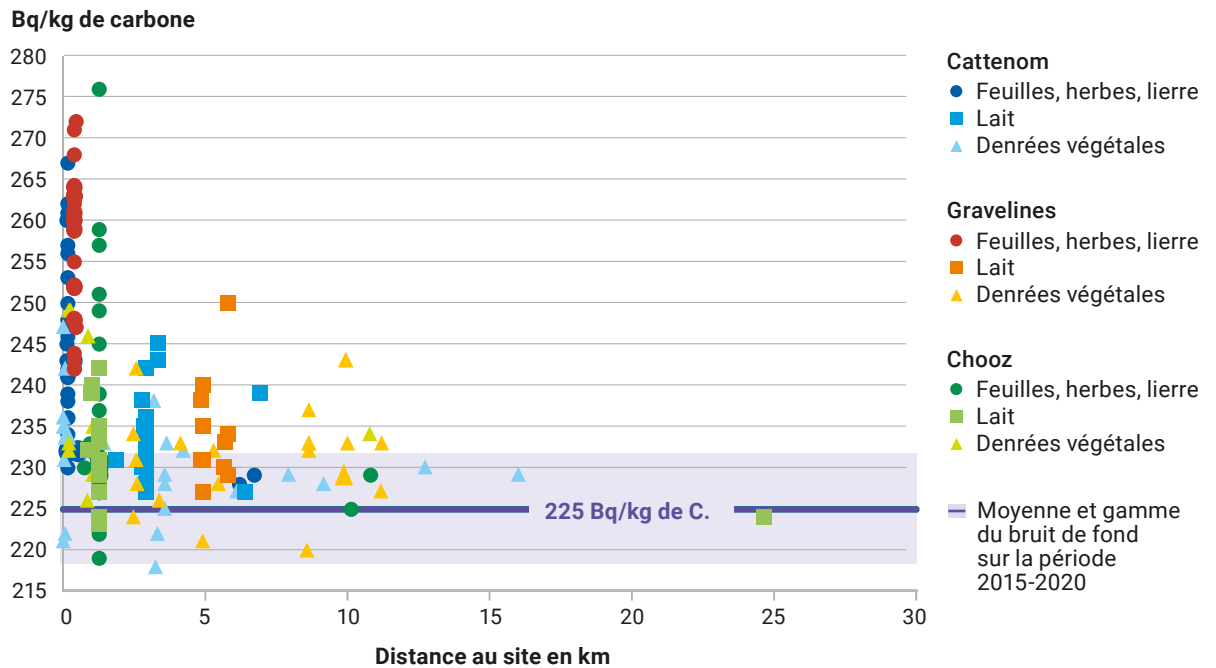
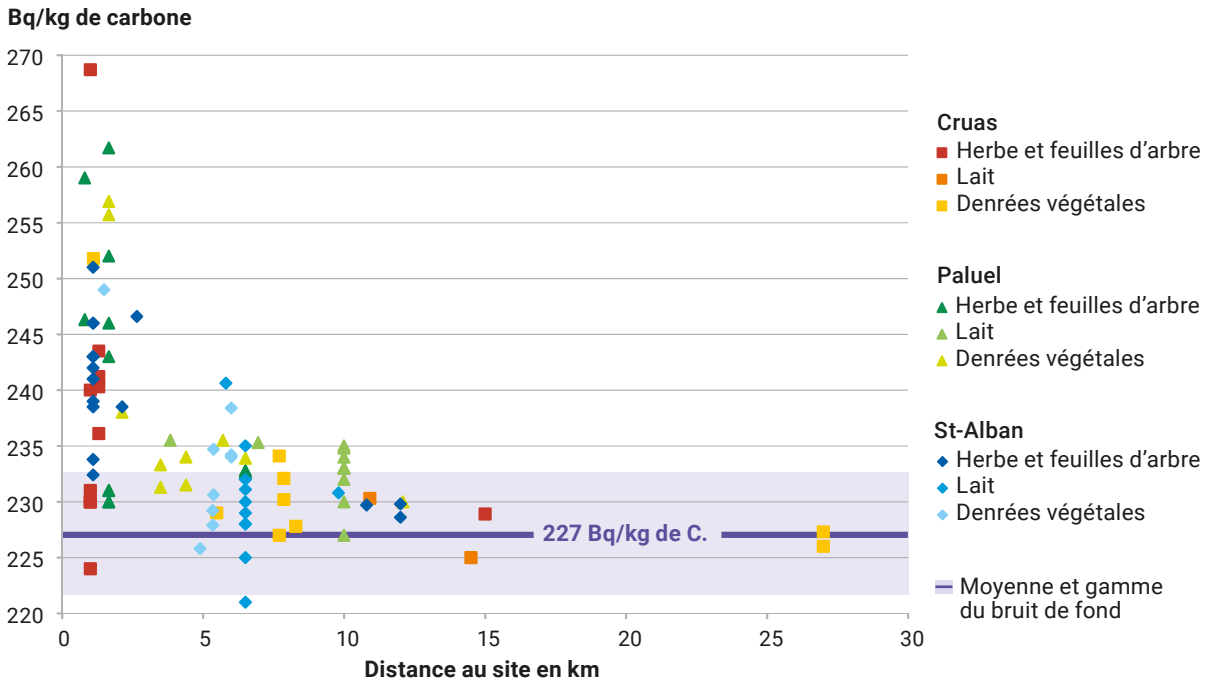
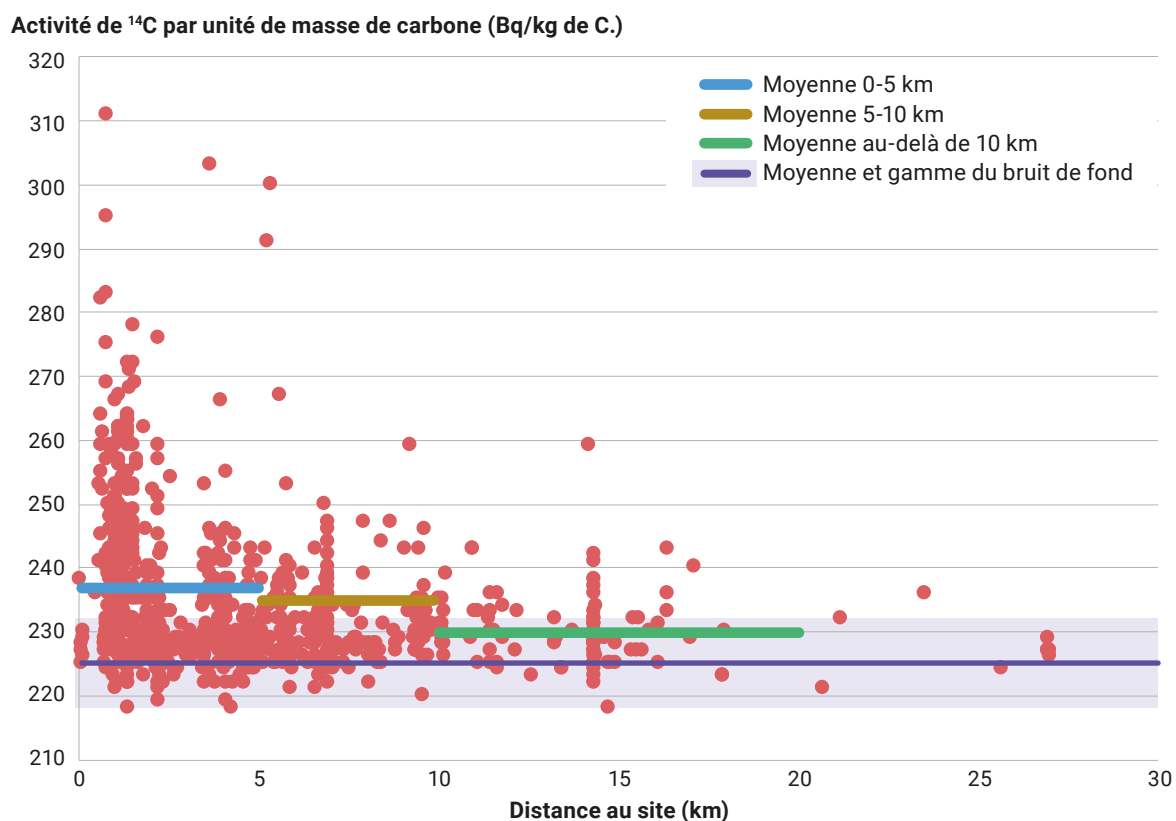


FIGURE 3 / VARIABILITÉ ET ÉVOLUTION, EN FONCTION DE LA DISTANCE AUX SITES, DES ACTIVITÉS DE CARBONE-14 PAR UNITÉ DE MASSE DE CARBONE (Bq/kg de carbone) MESURÉES ENTRE 2017 ET 2020 DANS DIFFÉRENTS TYPES DE VÉGÉTAUX, DE DENRÉES AGRICOLES OU ISSUES DE L'ÉLEVAGE, PRÉLEVÉS SOUS INFLUENCE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES DE L'ENSEMBLE DES CNPE



Prélèvement d'eau autour du CNPE du Blayais

© EDF/Philippe Eranian

FOCUS ÉTUDE RADIOLOGIQUE DU SITE DE SAINT-ALBAN

L'environnement du Centre nucléaire de production d'électricité (CNPE) d'EDF de Saint-Alban/Saint-Maurice, située dans le département de l'Isère (figure 1), a été choisi par l'IRSN pour réaliser, en complément de la surveillance régulière, un projet pilote d'étude radiologique de site, afin de mettre en place une méthodologie transposable à d'autres sites. Ce choix ne résulte pas d'une préoccupation environnementale ou sanitaire particulière, mais du fait que les acteurs locaux, au travers de la Commission locale d'information (CLI) de Saint-Alban, et l'exploitant (EDF), ont accepté d'en faciliter la réalisation.

FIGURE 1 / CENTRALE NUCLÉAIRE DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ (CNPE) D'EDF DE SAINT-ALBAN/SAINT-AURICE (Isère)



Ce programme d'étude prévu sur 3 ans (2019-2021), a pour objectifs principaux d'améliorer encore les connaissances scientifiques sur l'influence des rejets radioactifs de la centrale sur son environnement, d'estimer de manière plus réaliste l'exposition des populations avoisinantes en prenant en compte leurs habitudes de vie, et 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, afin de répondre à leurs préoccupations, de les aider à mieux appréhender la question du risque radiologique et de leur offrir la possibilité de participer au programme d'études. Pour cela, l'étude radiologique a été présentée à la CLI de Saint-Alban qui a mis en place un groupe de suivi. L'objet de ce groupe, composé d'acteurs locaux volontaires (élus, associations...) est de participer à l'élaboration des études, d'accompagner leur réalisation sur le terrain et de contribuer à la restitution des résultats afin que les membres puissent s'assurer de la prise en compte des attentes locales et partager les résultats avec la population ;

- ● ●
II. des études de terrain dans les différents milieux de l'environnement, par l'acquisition de mesures à proximité et à distance du site. Ces études permettent de diversifier les types de prélèvements et d'analyses, et de vérifier la bonne adaptation des outils de modélisation aux spécificités d'un site. Sur la base d'une étude préalable des données existantes et des estimations des codes de calculs utilisés à l'IRSN pour évaluer l'impact des rejets d'un CNPE sur son environnement, plusieurs études ont été proposées au groupe de suivi et menées dans l'environnement du site :
 - en milieu atmosphérique : une étude des niveaux de tritium dans l'air à proximité et à distance du site a été menée en 2019 afin de fournir des connaissances supplémentaires sur l'influence des rejets tritiés du CNPE ainsi que notamment de déterminer la variabilité spatiale des niveaux de tritium dans l'air autour de ce site, de contribuer à l'étude du transfert du tritium aux végétaux (cf. focus pp. 108-112). En parallèle, une étude des niveaux de radioactivité dans les aérosols a été réalisée en 2019 (figure 2), afin de compléter les connaissances sur les niveaux des différents radionucléides d'origine naturelle ou artificielle présents à l'état de traces dans les aérosols atmosphériques à proximité d'un CNPE. Cette étude a notamment permis de quantifier les activités des radionucléides provenant des rejets atmosphériques du CNPE dont les niveaux mesurés sont de l'ordre de grandeur de ceux observés lors d'études similaires menées à proximité d'autres CNPE et notamment à proximité du CNPE de Cruas-Meysses. Une campagne de mesure des niveaux de carbone-14 présent dans l'air à proximité du site a également été menée entre février et octobre 2019 à 1 kilomètre de la centrale sous les vents dominants ;

FIGURE 2 / STATION DE COLLECTE D'AÉROSOLS GRAND DÉBIT IRSN
AU POINT DE SURVEILLANCE SUD DU CNPE DE SAINT-ALBAN/SAINT-MAURICE



- en milieu terrestre : une étude des niveaux de radioactivité dans les denrées et les végétaux terrestres a été menée sur plus de 70 prélèvements à proximité et à distance du site, afin de mieux caractériser les activités de certains radionucléides, d'améliorer les connaissances sur la répartition de ces activités en fonction de la distance au site et de l'azimut, de comprendre et de vérifier la cohérence des mécanismes de dispersion et de transfert des radionucléides rejetés dans l'environnement (figure 3). Les prélèvements des autres productions de denrées terrestres (viande, fromage, œuf, gibier) sont en cours, en collaboration avec les producteurs locaux et les associations de chasses locales. Cette étude sera complétée par une étude de « plateaux-repas », constitués en partie de produits locaux, servis dans certains établissements de communes proches et éloignées de la centrale ;

FIGURE 3 / PRÉLÈVEMENT DE MAÏS À PROXIMITÉ DU CNPE DE SAINT-ALBAN/SAINT-AURICE



© IRSN



- en milieu aquatique : une étude des niveaux de tritium dans les eaux de nappes phréatiques est en cours depuis fin 2020 et ce, pour un an, afin de discriminer l'influence éventuelle du site, de marquages déjà présents dans les eaux souterraines soumises à l'influence potentielle du Rhône, et de mesurer précisément l'activité en tritium des eaux de boisson des communes du périmètre d'étude, afin d'affiner le calcul de l'exposition des populations locales. Une étude est également en cours en partenariat avec les fédérations de pêches locales, afin de disposer de résultats sur des poissons consommés par les riverains et d'améliorer les connaissances sur le transfert du tritium et du carbone-14 au sein de la chaîne trophique. Une étude des activités de tritium dans les eaux du Rhône en fonction des rejets et des conditions hydrogéologiques a débuté en 2021 afin d'améliorer les simulations du transfert des radionucléides présents dans les masses d'eau depuis le point de rejet jusqu'au débouché du Rhône. Ces études seront suivies d'une étude des végétaux aquatiques utilisés comme indicateurs de l'activité dans l'eau de certains radionucléides rejetés par les centrales nucléaires, en raison de leur capacité à concentrer ces radionucléides, ainsi que d'une étude sur les différentes formes chimiques du carbone-14 présentes dans l'eau ;

- III. Des enquêtes de proximité pour actualiser les informations sur les modes de vie des habitants résidant autour du site. Ces données sont indispensables pour réaliser une évaluation dosimétrique plus réaliste de l'exposition des populations locales. Ainsi, une enquête sur les habitudes alimentaires et sur les emplois du temps (temps passé en extérieur et en intérieur, à proximité et à distance du site...) a été réalisée entre juillet et août 2020, dans 34 communes, dans un périmètre de 10 km autour de la centrale, auprès de 120 foyers qui ont répondu favorablement afin de caractériser le taux de consommation des produits d'origine locale. L'IRSN a ainsi recueilli 114 carnets de consommations familiales et 275 emplois du temps individuels. Il apparaît des premiers résultats disponibles que les personnes enquêtées restent majoritairement à l'intérieur d'habitations dans la zone d'étude que ce soit en journée normale d'activité ou en journée de congé, et qu'elles quittent la zone d'étude environ deux mois par an. Ces premiers résultats montrent également une forte contribution à la ration alimentaire moyenne des légumes et des fruits, ainsi que des taux d'autoconsommation très élevés de certaines catégories d'aliments (légumes, fruits, pommes de terre) par rapport aux moyennes nationales. Le terroir local étant très riche, les habitants enquêtés accordent beaucoup d'importance aux produits locaux. Le contexte sanitaire post-confinement (Covid-19), lors de l'enquête, a probablement joué un rôle très important dans ces résultats ; en effet, la période de confinement au mois de mars à mai 2020 a été propice à la culture des jardins et le niveau d'autosuffisance a été très important. Ces enquêtes sont complétées par l'acquisition d'informations sur l'utilisation de l'environnement de la centrale de manière à : quantifier la part des espaces naturels/agricoles/artificialisés, identifier les principaux équipements publics accueillant du public quotidiennement ou ponctuellement, identifier les sites naturels touristiques (étangs de pêche, bases de loisirs, parcours santé, accès aux rivières, pistes cyclables, campings, circuits de grande randonnée...).

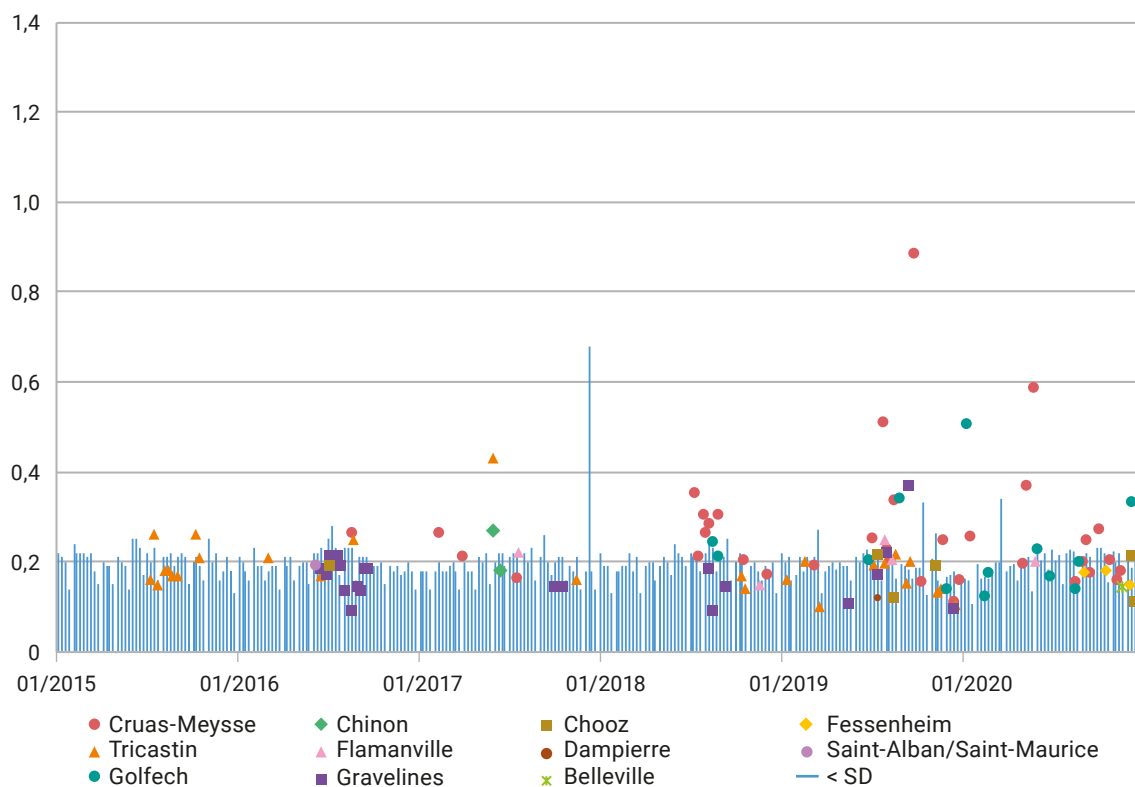
Sur la base de la ration alimentaire et des pourcentages de denrées d'origines locales fournies au chapitre 9 d'annexes, les doses dues au ^{14}C résultant de l'ingestion de denrées produites dans un rayon de 5 km autour d'un CNPE sont estimées à $0,09 \mu\text{Sv}/\text{an}$ et à $0,07 \mu\text{Sv}/\text{an}$ si elles sont produites dans un rayon de 10 km autour d'un CNPE. Ces estimations sont du même ordre que celles estimées par EDF par calcul à partir des rejets atmosphériques de carbone-14. À titre illustratif, ces doses calculées par EDF à partir des rejets de 2016 étaient de $0,026 \mu\text{Sv}/\text{an}$ pour Cruas et $0,023 \mu\text{Sv}/\text{an}$ pour Gravelines. Ces estimations sont par ailleurs très proches de celles présentées dans des *Bilans radiologiques* précédents (cf. Synthèse dosimétrique p. 292).

Influence des rejets d'effluents à 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. Plus de 99 % des 2 637 échantillons prélevés sur la période 2018-2020, avaient une activité volumique inférieure à $0,25 \text{Bq}/\text{m}^3$ (figure 4). À noter qu'autour du site de Cruas, 10 % des analyses dépassent cette valeur de $0,25 \text{Bq}/\text{m}^3$ avec une activité maximale mesurée de $1,25 \text{Bq}/\text{m}^3$ qui reste cependant 40 fois inférieure à la limite réglementaire qui est de $50 \text{Bq}/\text{m}^3$ (décision n° 2017-DC-0588 de l'ASN du 6 avril 2017).

FIGURE 4 / ACTIVITÉS VOLUMIQUE DE TRITIUM (HTO) DANS L'AIR (Bq/m^3) MESURÉES AUTOUR DES CNPE DEPUIS 2015

Activité de tritium (HTO) dans l'air en Bq/m^3



La quantification précise des activités en tritium dans l'air sous influence d'un CNPE a pu être faite au cours de la campagne de mesure 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. focus pp. 108-112). La concentration 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). Les activités volumiques mesurées lors de ces deux campagnes sont cohérentes avec celles mesurées par EDF ; elles ne sont pas assez élevées pour être mesurées dans le cadre de la surveillance de routine réalisée par EDF. Néanmoins, ces valeurs 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 dans l'air et d'impact dosimétrique.

Même pour une personne qui résiderait toute l'année à l'emplacement où était installée la station 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 µSv/an. Cette estimation est cohérente avec celle calculée par EDF sur la base des rejets de 2016, 0,0024 µSv/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 le groupe de référence (cf. chapitre 9 d'annexes) qui se situe sur la commune de Savasse à 3,5 km du site.

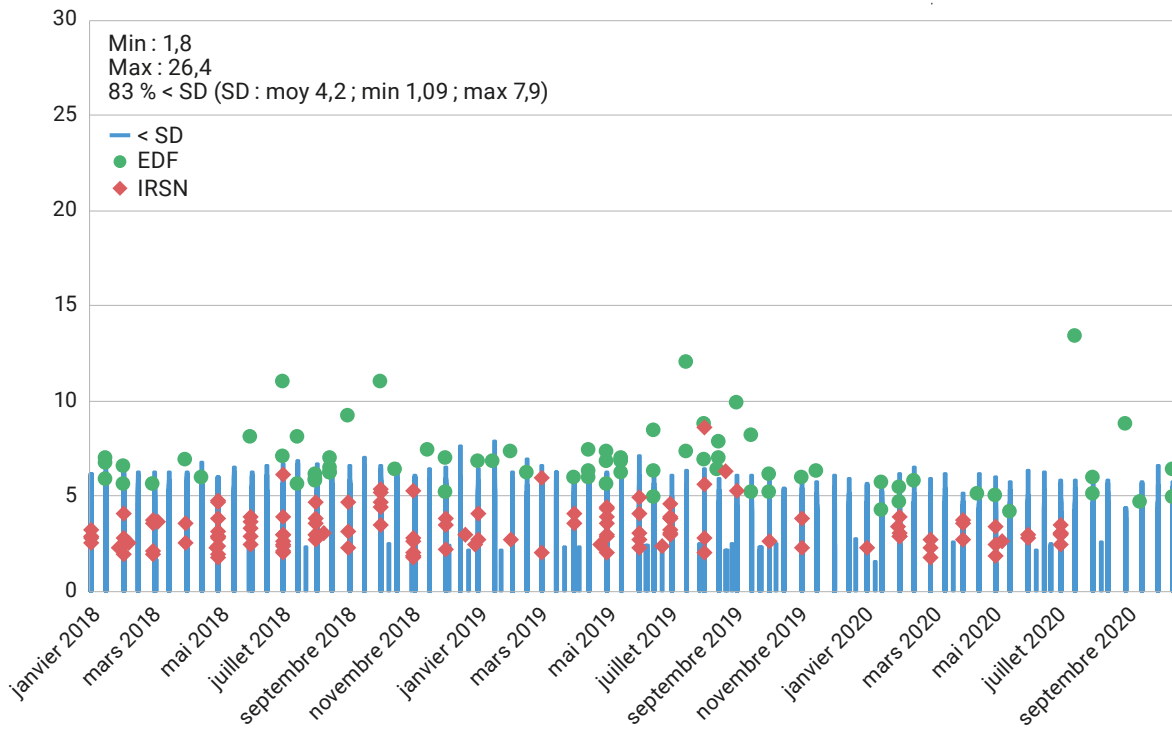
La figure 5 présente les activités de tritium (HTO) mesurées dans les eaux de pluie prélevées à proximité des CNPE. Ces activités sont tout à fait cohérentes avec celles mesurées dans l'air. On rappelle qu'à une activité de 1 Bq/L dans la vapeur d'eau de l'air correspond une activité de l'ordre de 0,01 Bq/m³ d'air. Et ainsi, les activités moyennes de 4 Bq/L mesurées dans les eaux de pluies 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) mesurée 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 en 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.

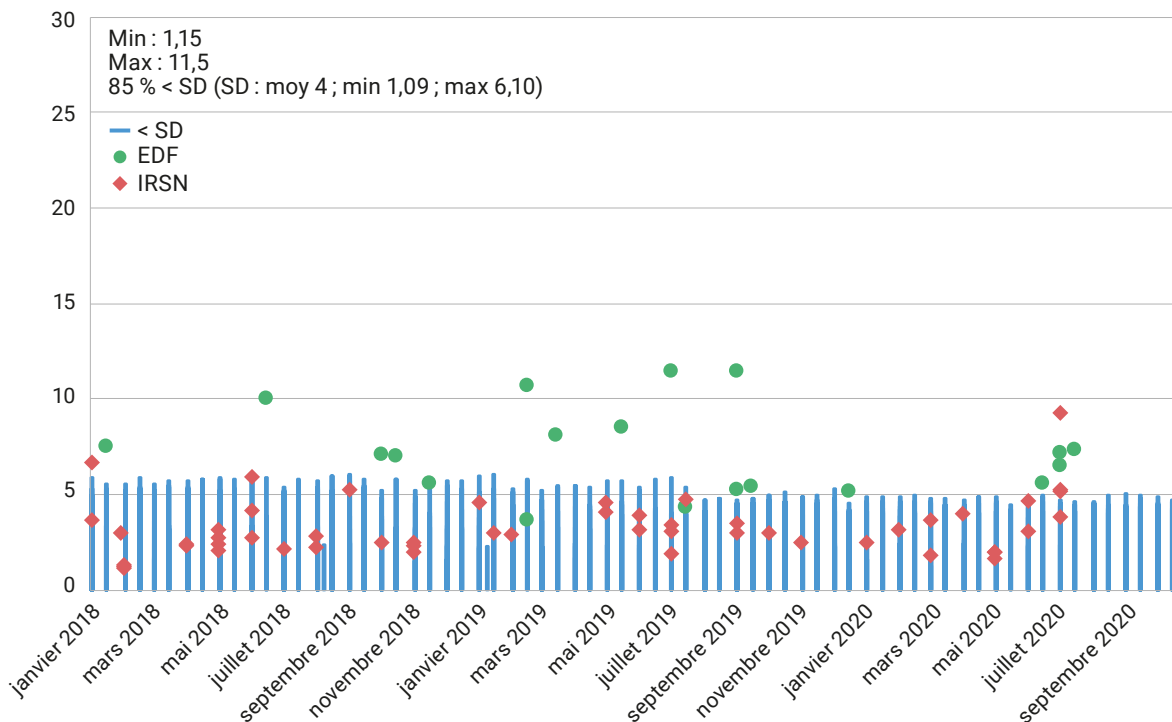
La figure 6 présente les activités de tritium organiquement lié dans divers échantillons prélevés à proximité des CNPE sur deux périodes : 2014-2016 (figure 6A) et 2017-2020 (figure 6B). Comme les figures 2 et 3 relatives au carbone-14, cette figure montre que l'influence des rejets atmosphériques tritiés de ces installations diminue très rapidement avec la distance. Pour la période 2017-2020, la moyenne des 97 résultats d'analyses des échantillons provenant d'un rayon de 5 km autour des CNPE, d'une valeur de 2,1 Bq/L, est 2 fois plus élevée que la valeur de référence du bruit de fond. Il faut toutefois noter que seulement 36 % des échantillons prélevés dans ce rayon ont une teneur en tritium qui sort de la gamme de variabilité de ce bruit de fond (de 0,5 à 2,2 Bq/L). La moyenne sur cette période est par ailleurs très proche de celle de 2,3 Bq/L établie pour la période précédente (2014-2016) et mentionnée dans le précédent *Bilan radiologique*. Au-delà de 10 km, l'activité du tritium établie est identique à celle du précédent bilan, 1,4 Bq/L, et s'approche du bruit de fond ; au-delà de 15 km aucune teneur en tritium ne sort de la gamme du bruit de fond sur la période 2017-2020.

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

Tritium dans les eaux de pluies prélevées aux points AS1 des CNPE continentaux entre 2018 et 2019 (Bq/L)

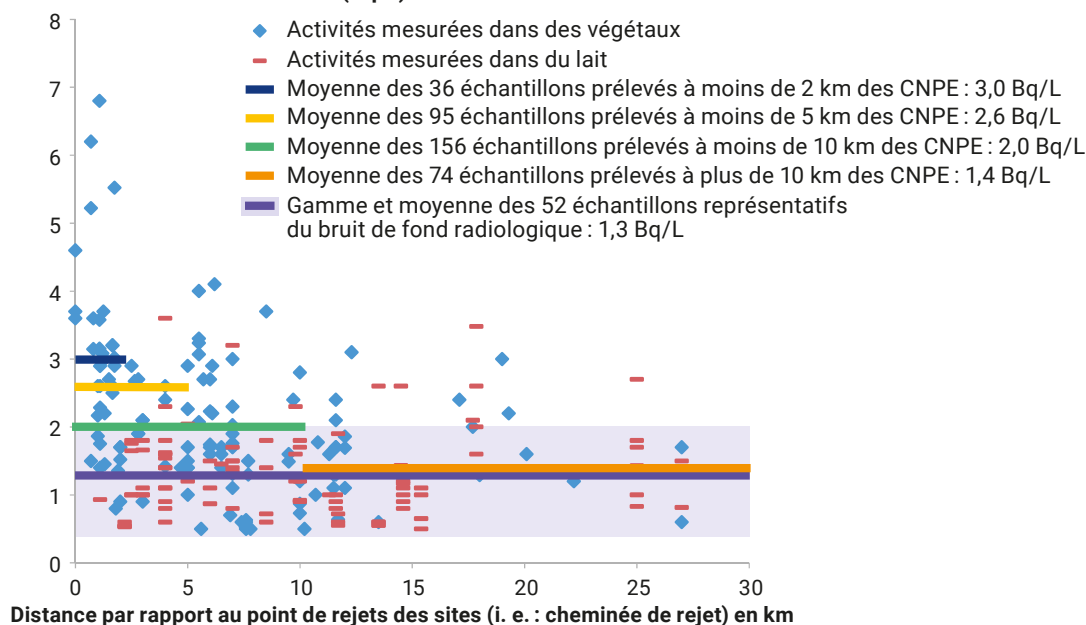


Tritium dans les eaux de pluies prélevées aux points AS1 des CNPE marins entre 2018 et 2019 (Bq/L)

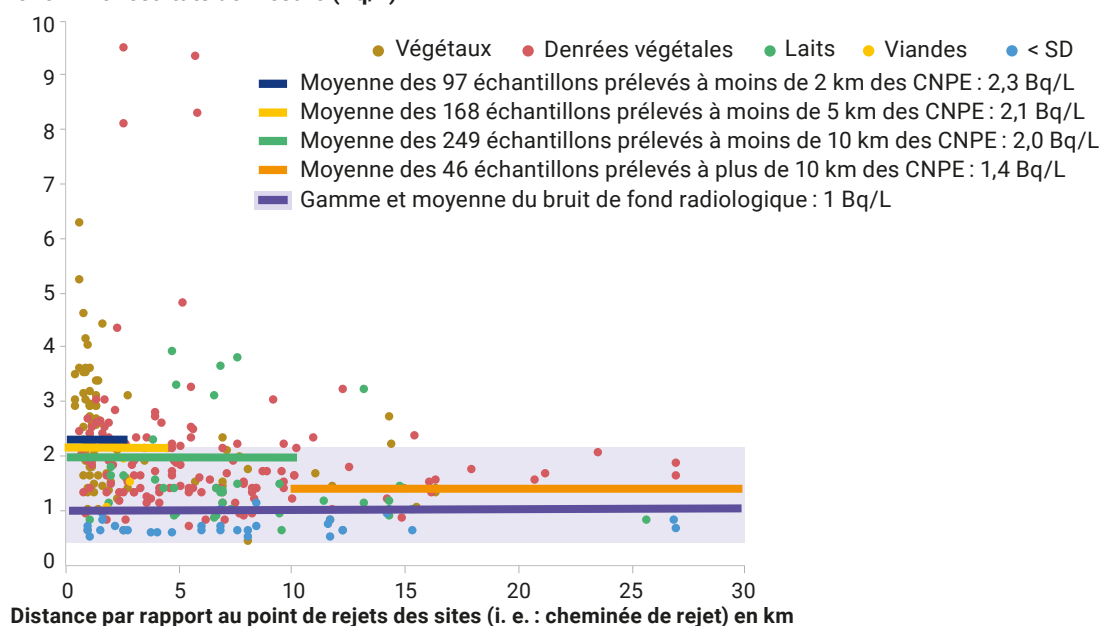


FIGURES 6A ET 6B / ÉVOLUTION ET VARIABILITÉ DES ACTIVITÉS DE TRITIUM LIÉ À LA MATIÈRE ORGANIQUE (Bq/L d'eau de combustion) DANS DIVERSES COMPOSANTES DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE, EN FONCTION DE LA DISTANCE AUX ÉMISSAIRES DE REJETS ATMOSPHÉRIQUES DES CNPE

2014-2016 : 230 résultats de mesure (Bq/L)



2017-2020 : 295 résultats de mesure (Bq/L)



FOCUS
**ÉTUDE DES NIVEAUX DE TRITIUM
DANS L'AIR DANS L'ENVIRONNEMENT
DU CNPE DE SAINT-ALBAN/SAINT-MAURICE**

L'étude des niveaux de tritium dans l'air, menée de janvier à octobre 2019 dans le cadre de l'étude radiologique de l'environnement du CNPE de Saint-Alban/Saint-Maurice (cf. focus pp. 100-103) avait pour objectifs de déterminer la variabilité spatiale des niveaux de tritium dans l'air autour de ce site et d'expliquer ainsi la grande variabilité

des teneurs en tritium dans les végétaux observée dans le cadre de la surveillance réglementaire (figure 6, p. 107). Dans un second temps, ces résultats seront utilisés pour tester la capacité des codes de calculs de dispersion atmosphérique de l'IRSN à prendre en compte les spécificités d'un site, pour contribuer à l'étude du transfert du tritium aux végétaux et enfin pour affiner l'évaluation de l'exposition des populations avoisinantes.

Pour ce faire, l'IRSN a déployé, avec la collaboration des acteurs locaux et de l'exploitant, deux types de dispositifs de prélèvement en continu : des « piègeurs passifs tritium » (figure 1) entre 1 et 8 km du site, et un « barboteur tritium » (figure 2) à 1 km du site sous les vents dominants, au point supposé d'influence maximale des rejets. Les prélèvements réalisés tous les 15 jours, associés à une métrologie du tritium dans l'eau performante, ont permis de déterminer précisément les niveaux d'activité en tritium de la vapeur d'eau de l'air sur une zone géographique étendue autour du CNPE, ainsi que de connaître précisément les contributions des différentes formes chimiques du tritium dans les activités en tritium total mesuré au point le plus influencé par les rejets. La comparaison des résultats obtenus par ces deux types de dispositifs déployés au même emplacement a également permis de valider les méthodologies et les hypothèses retenues pour les périodes considérées.

FIGURE 1 / INSTALLATION DES DISPOSITIFS DE PIÉGEAGE PASSIF DE LA VAPEUR D'EAU DE L'AIR

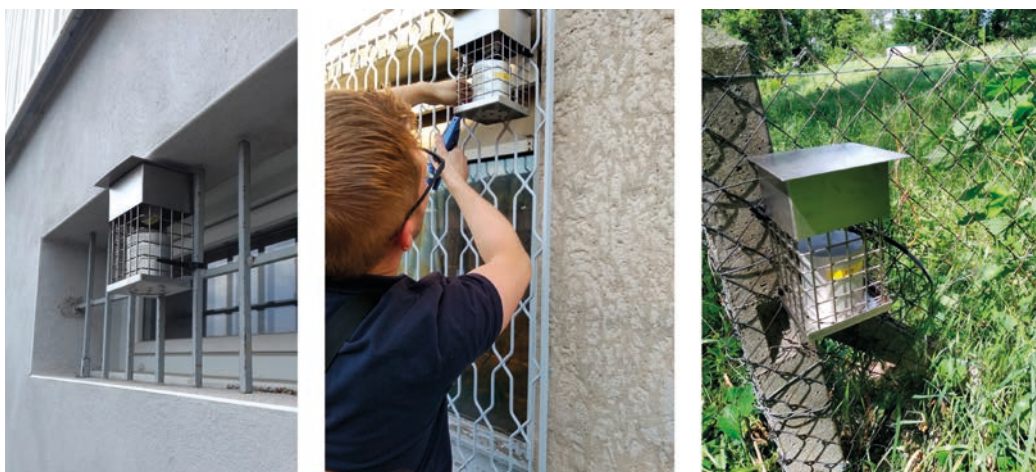


FIGURE 2 / INSTALLATION DU BARBOTEUR TRITIUM À 1 KM AU SUD DU CNPE DE SAINT-ALBAN



Piégeurs passifs tritium

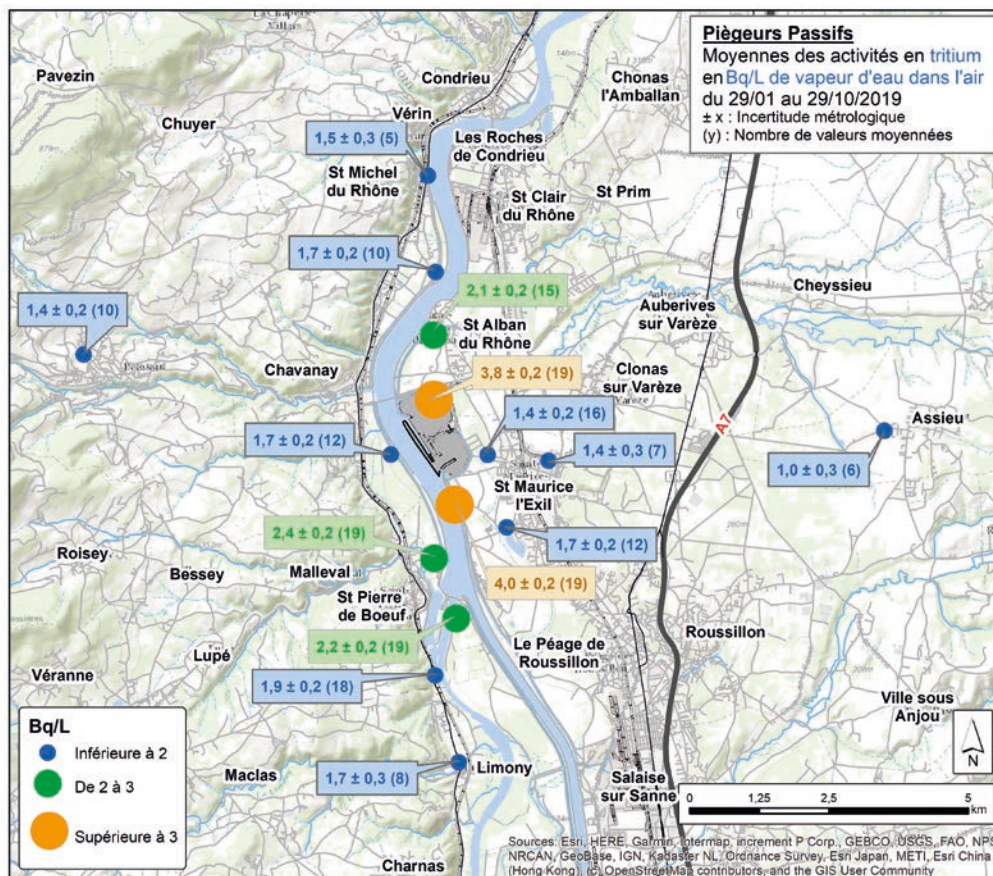
Pour déterminer l'implantation de ces dispositifs de prélèvement de la vapeur d'eau de l'air, qui ne nécessitent pas d'alimentation fixe en énergie (cf. focus p. 14-15 du BR 2015-2017), la zone géographique potentiellement influencée par les rejets atmosphériques du CNPE a été modélisée à l'aide des codes de calcul utilisés à l'IRSN en prenant en compte les rejets annuels du CNPE et la rose des vents de ces dernières années. À l'aide de ces résultats de modélisation, des informations tirées des résultats des mesures faites dans des végétaux dans le cadre de la surveillance, et en fonction des moyens disponibles pour cette étude, 15 points de prélèvements ont été appareillés progressivement entre janvier et novembre 2019. Les premiers dispositifs ont été installés à proximité immédiate du CNPE (1 km) et sur 4 km dans l'axe des vents dominants (nord-sud). À la lecture des premiers résultats, l'emprise territoriale des prélèvements a été élargie progressivement afin de déterminer l'extension maximale de la zone influencée et ce jusqu'à 7 et 8 kilomètres du site hors axe des vents dominants (est et ouest). Ces deux points ont été disposés pour confirmer que ces zones sont bien hors influence et que les niveaux mesurés sont bien dans la gamme du bruit de fond en tritium à l'échelle nationale.

Avec une période de prélèvement de 15 jours, ces dispositifs ont permis de récolter près de 200 résultats de mesure de tritium sous forme d'eau tritiée (HTO).

Chaque piègeur passif tritium implanté est systématiquement associé à un hygromètre numérique afin de mesurer et récupérer à la fin de chaque période de prélèvement, les données de température et d'humidité. Ces informations permettent de convertir à l'aide d'hypothèses, les activités de tritium dans la vapeur d'eau atmosphérique, exprimées en Bq/L, en activités volumiques exprimées en Bq/m³ d'air.

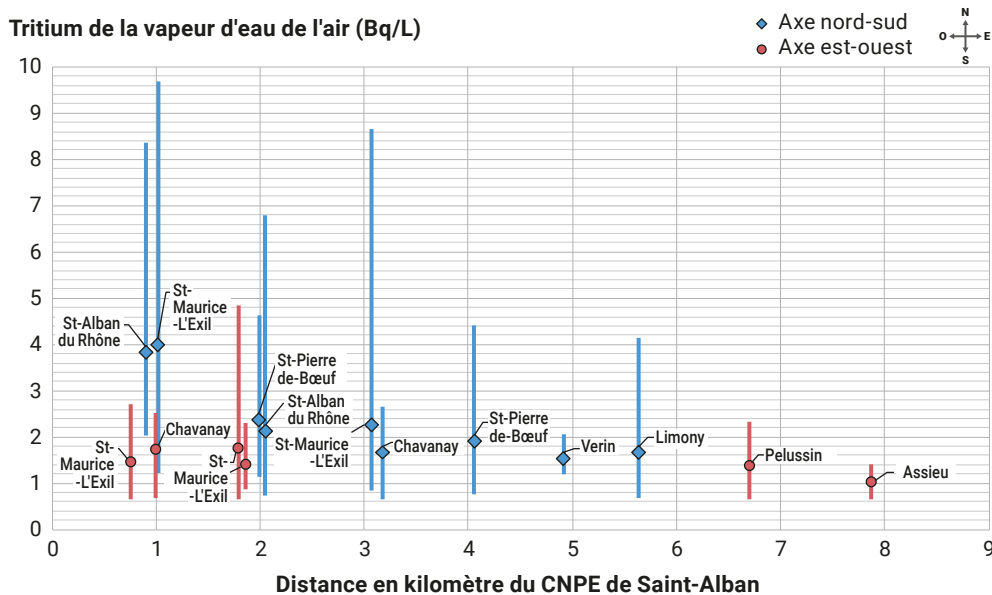
Les moyennes des activités volumiques bimensuelles mesurées en Bq/L de vapeur d'eau dans l'air aux différents points de prélèvements sont représentées sur la figure 3. Les données acquises à l'aide des piègeurs passifs font apparaître que les activités mesurées en tritium dans la vapeur d'eau de l'air sont, comme attendu, maximales à 1 kilomètre au nord et au sud du site, sous les vents dominants, avec une moyenne sur l'ensemble de l'étude de l'ordre de 4 Bq/L de vapeur d'eau dans l'air (environ 0,04 Bq/m³ d'air). Il apparaît également que ces activités diminuent avec la distance au site pour rejoindre très rapidement, entre 3 et 4 km sous les vents dominants, et dès le premier kilomètre à l'est et à l'ouest du site, des activités proches du bruit de fond mesuré hors influence d'installations nucléaires.

FIGURE 3 / MOYENNES DES ACTIVITÉS VOLUMIQUES EN TRITIUM DANS LA VAPEUR D'EAU DE L'AIR PRÉLEVÉE À L'AIDE DE PIÈGEURS PASSIFS TRITIUM DU 29 JANVIER AU 29 OCTOBRE 2019 À PROXIMITÉ DU CNPE DE SAINT-ALBAN/SAINT-MAURICE (en Bq/L de vapeur d'eau de l'air)



La représentation cartographique des moyennes des activités volumiques en tritium dans la vapeur d'eau de l'air de la figure 3 ne permet pas de visualiser la variabilité des activités mesurées sur la période d'étude. La figure 4 représente une synthèse graphique des variations des activités de tritium dans la vapeur d'eau de l'air prélevée à l'aide des piègeurs passifs par commune instrumentée et ce en fonction de la distance au site du lieu de prélèvement d'une part et de son orientation géographique selon 2 axes : nord-sud (vents dominants) et est-ouest d'autre part.

FIGURE 4 / SYNTHÈSE DE LA GAMME DES ACTIVITÉS ET DES MOYENNES DE TRITIUM DANS LA VAPEUR D'EAU DE L'AIR MESURÉES À L'AIDE DES PIÉGEURS PASSIFS DANS L'ENVIRONNEMENT DU CNPE DE SAINT-ALBAN/SAINT-MAURICE DE JANVIER À OCTOBRE 2019 (Bq/L)



Il apparaît sur cette représentation que les variabilités les plus importantes sont observées au niveau des points de prélèvement les plus proches du site et situés dans l'axe des vents dominants (axe nord-sud). Du fait de leur proximité avec le site et de leur positionnement géographique, ces points de prélèvements sont les plus exposés au panache d'air marqué par les rejets atmosphériques tritiés du CNPE. Néanmoins ce panache est relativement étroit car encore peu dispersé et les activités de tritium varient fortement avec les changements de direction du vent, si faibles soient-ils. Avec la distance au site, même sous les vents dominants, la dispersion des rejets se traduit par des concentrations plus faibles et plus homogènes. Comme attendu, l'activité et la variabilité décroissent en fonction de la distance dans l'axe des vents dominants.

Ces variations des activités de tritium dans la vapeur d'eau de l'air en fonction de la distance et de l'azimut au site, nous permettent notamment d'expliquer les fortes variabilités constatées lors de l'analyse des activités mesurées dans les matrices terrestres prélevées à proximité des CNPE, pour le tritium (figure 6 p. 107) et aussi pour le carbone-14 (figures 2A, 2B et 3 pp. 98-99), dont la dispersion est similaire. Cette évolution de la variabilité à proximité des CNPE illustre également l'importance de privilégier l'azimut dans la recherche d'une zone de prélèvement à proximité immédiate du site.

●●● Barboteur tritium

Un barboteur tritium « quatre pots » permettant de mesurer le tritium total de l'air, en distinguant d'une part la contribution du tritium sous forme d'eau tritiée (HTO) et d'autre part la contribution des autres formes gazeuses (HT, CH₃T...), a été installé au point de concentration maximal situé à 1 km du CNPE sous les vents dominants (AS1) de février à octobre 2019. Il se trouvait ainsi à proximité du piègeur passif et du barboteur « 2 pots » d'EDF utilisé dans le cadre de la surveillance qui permettent de mesurer seulement l'activité de tritium sous forme d'eau tritiée qui est la forme prédominante dans les rejets atmosphériques du CNPE. Ces prélèvements, d'une durée de 15 jours, associés à une métrologie du tritium dans l'eau très performante ont pour objectifs de connaître précisément les niveaux d'activité en tritium total de l'air, de mesurer les différentes formes chimiques du tritium présentes et de comparer les résultats en tritium libre (HTO) avec ceux du piègeur passif.

Durant la période d'étude de février à octobre 2019, 17 périodes de prélèvement ont été étudiées, soit 68 résultats de mesure de tritium. Les activités en tritium total obtenues avec le barboteur « quatre pots » sont comprises entre 0,020 et 0,082 Bq/m³ d'air pour une moyenne de 0,047 Bq/m³ d'air. Les activités en tritium libre (HTO) sont comprises entre 0,013 et 0,071 Bq/m³ d'air pour une moyenne de 0,039 Bq/m³ d'air, ce qui représente 83 % de l'activité moyenne en tritium total. Les autres formes gazeuses (HT, CH₃T) mesurées varient entre 0,004 et 0,014 Bq/m³ d'air pour une moyenne d'environ 0,008 Bq/m³, soit 17 % de l'activité moyenne en tritium total.

Ces résultats sont tout à fait concordants avec ceux mesurés lors d'une précédente étude réalisée à proximité du CNPE de Cruas-Meysses entre mai 2015 et mai 2016 (cf. pp. 84-85, focus BR 2015-2017). Il apparaît également que la moyenne des activités mesurées de la vapeur d'eau tritiée (HTO) prélevée à l'aide du barboteur tritium est très proche de celle déterminée à l'aide du piègeur passif disposé au même emplacement, ce qui nous permet de conforter la validité des résultats acquis quel que soit le moyen de prélèvement utilisé.

Conclusion

L'étude des niveaux en tritium de l'air dans l'environnement du CNPE de Saint-Alban/Saint-Maurice a permis de mieux caractériser la zone influencée par les rejets atmosphériques tritiés de la centrale en mesurant précisément les niveaux d'activité de tritium libre contenu dans la vapeur d'eau de l'air en différents points dans un rayon de 10 kilomètres d'une part et en mesurant précisément les différentes formes chimiques du tritium au point de concentration maximale d'autre part. Les activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées dans les végétaux terrestres prélevés sur la même période sont du même ordre de grandeur que les moyennes des activités mesurées dans la vapeur d'eau atmosphérique à l'aide des piègeurs passifs tritium disposés à proximité durant leur croissance, ce qui est conforme aux connaissances radioécologiques sur le comportement du tritium dans l'environnement.

Les données acquises permettent de proposer une estimation de l'exposition au tritium par inhalation et par passage transcutané de ce radionucléide. Ainsi, pour une personne adulte résidant et travaillant à Assieu, point de référence local hors influence de l'installation, et où l'activité moyenne de tritium dans l'air est la plus faible (0,012 Bq/m³), la dose par inhalation et absorption transcutanée serait de l'ordre de 0,0038 µSv/an. Cette dose est imputable au bruit de fond du tritium dans l'air d'origine naturelle ou hérité des retombées anciennes des essais d'armes nucléaires. Pour une personne résidant et travaillant à proximité du point AS1 du CNPE où l'activité moyenne est la plus élevée (0,047 Bq/m³), la dose par inhalation et absorption transcutanée serait de l'ordre de 0,0123 µSv/an soit une dose ajoutée estimée à + 0,0085 µSv/an par rapport à un adulte résidant à distance du site.

Une évaluation dosimétrique plus fine sera réalisée à l'issue des études portant sur le tritium dans les denrées et sur les modes de vie.



Le CNPE de Chooz

© EDF/Jean-Louis Burnod

Les valeurs 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 0,5 Bq/L à plus de 6 Bq/L. 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 est illustrée dans le focus pp. 108-112. Il faut toutefois noter que les activités de tritium mesurées dans quatre échantillons de maïs, prélevés de 2018 à 2020 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 et qui pourraient être liées à une utilisation d'eau du Rhône pour irrigation.

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 9, 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 0,002 $\mu\text{Sv}/\text{an}$; elle est quasiment inchangée par rapport à celle estimée pour la période précédente (0,003 $\mu\text{Sv}/\text{an}$) et demeure très faible.

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

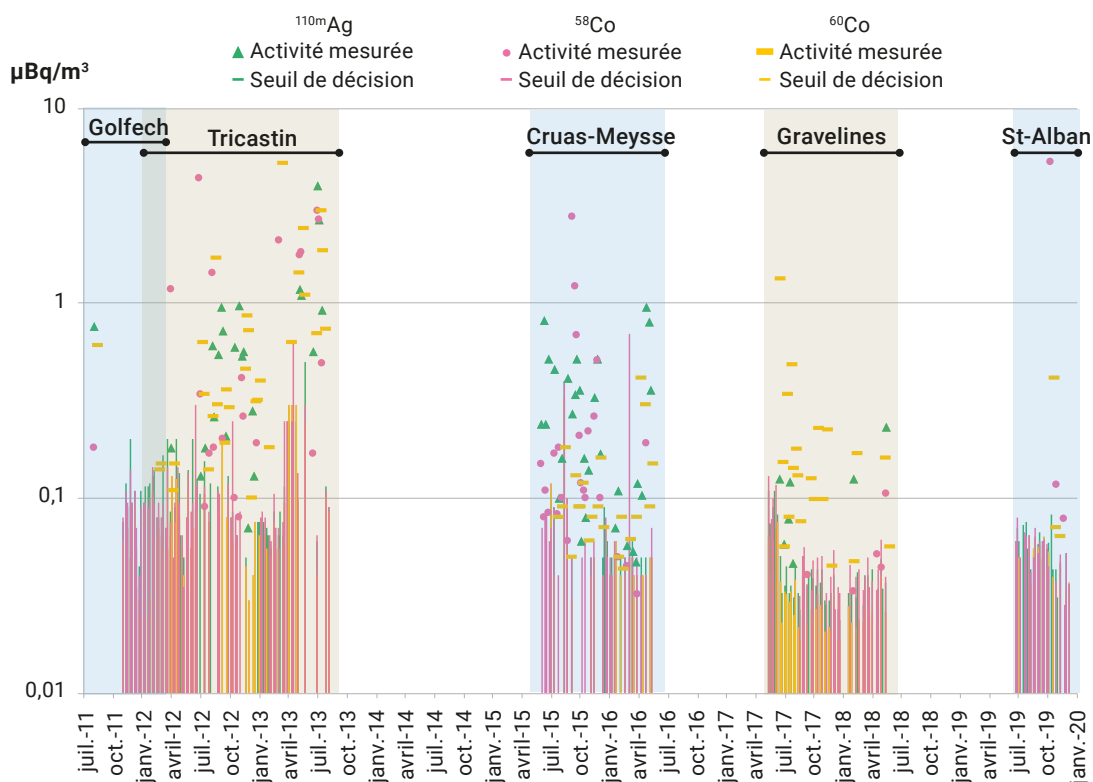
Les activités des autres radionucléides rejetés annuellement sont de l'ordre de 10 000 à 100 000 fois inférieures à celles du tritium et du carbone-14. Il s'agit principalement des césium-134 et césium-137, des cobalt-58 et cobalt-60, de l'argent-110m et d'isotopes radioactifs de l'iode. Les activités de ces radionucléides dans l'air ou dans l'environnement terrestre sont beaucoup trop faibles pour être mesurées dans le cadre des surveillances de routine effectuées par EDF ou par l'IRSN. Toutefois, les progrès météorologiques récents ont permis à l'IRSN de réaliser des campagnes de mesures d'expertise de ces radionucléides dans les aérosols atmosphériques (cf. focus pp. 86-89 du *Bilan radiologique 2015-2017*) à proximité de certains CNPE. Pour chaque campagne, une station de prélèvement d'aérosols à grand débit (autour de 300 m^3/h) est installée à une distance de l'ordre de 1 km des émissaires de rejets sous les vents dominants (à la station de mesure réglementaire dite « AS1 »). La dernière campagne a été réalisée au point AS1 du CNPE de Saint-Alban/Saint-Maurice de juin 2019 à décembre 2019.

La figure 7 présente le résultat de ces campagnes menées depuis 2011. Pour les trois radionucléides régulièrement mesurés (^{58}Co , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$) autres que le césium-137, également mesuré en dehors d'influence des CNPE, les activités sont très faibles et comprises entre 0,03 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ et 5 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Dans le cas du site du Tricastin, bien que les rejets des autres installations présentes sur le site ne soient que de l'ordre du dixième de ceux du CNPE, ils contribuent aux activités mesurées qui ne peuvent donc pas être imputées au seul CNPE. C'est probablement ce qui explique que d'autres radionucléides (^{95}Zr , ^{54}Mn , ^{51}Cr , ^{57}Co et ^{124}Sb) ont pu être décelés et quantifiés autour de ce site bien que de manière très sporadique. Par ailleurs, le positionnement optimal de la station installée à Cruas au regard des conditions et caractéristiques météorologiques locales et la puissance des réacteurs implantés (4 x 900 MWe), permet de penser que les activités mesurées sur ce site sont représentatives des activités parmi les plus élevées susceptibles de résulter des rejets d'un CNPE en exploitation. Malgré les rejets plus importants du site de Gravelines, les activités mesurées y sont cependant plus faibles qu'à Cruas du fait d'une rose des vents moins contrastée. Enfin, les fréquences de détection dans l'air des radionucléides imputables aux rejets des sites ont été plus faibles pour les CNPE de Golfech et Saint-Alban/Saint-Maurice dont la puissance totale est plus faible (2 x 1 300 MWe).

Le césium-137, mesuré lors de ces campagnes provient des rejets des CNPE et aussi de la rémanence dans l'air des retombées de l'accident de Tchernobyl. Cette rémanence est entretenue par la remise en suspension dans l'air de particules de sol ainsi que de poussières générées notamment par la combustion de la matière organique (le bois de chauffage par exemple). C'est pourquoi le césium-137 a pu être mesuré sur 76 % à 100 % des filtres analysés, avec des activités volumiques variant de 0,03 à 1,6 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Une étude récente a permis d'estimer que la contribution spécifique des rejets d'un CNPE aux activités de césium-137 mesurées dans les aérosols à 1 km est de l'ordre de 0,1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

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.

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



Une activité volumique de cobalt-60 de $57,4 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$, très supérieure à toutes les activités mesurées lors de ces campagnes, a été mesurée sur le filtre prélevé à la station de surveillance de l'IRSN installée à 1 km du CNPE de Gravelines et couvrant la période du 16 au 23 avril 2018. Ce résultat inhabituel a déclenché des investigations complémentaires de l'IRSN et de l'exploitant qui ont conduit à valider ce résultat et à mesurer sur ce même filtre, une activité de $1,7 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ de manganèse-54, radionucléide très rarement mesuré à proximité des CNPE car rejeté en quantité beaucoup plus faible. Aucun autre radionucléide artificiel imputable au site n'a été mesuré. Bien que des hypothèses aient été émises (conditions météorologiques particulières, remise en suspension de poussières générées par des travaux, embruns venant du canal...), il n'a pas été possible de conclure sur l'origine de cette valeur anormale.

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 à feuilles par exemple (salades, épinards...), les activités seraient inférieures à $1 \text{ mBq}/\text{kg}$ 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 $10 \text{ mBq}/\text{kg}$ frais pour les ^{60}Co , ^{58}Co et $^{110\text{m}}\text{Ag}$). Dans le cas du ^{137}Cs , il est à noter que l'activité ajoutée ne peut être distinguée de la rémanence des retombées anciennes (cf. chapitre 2) 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 ($0,09 \mu\text{Sv}/\text{an}$) ou de l'ingestion potentielle de tritium via l'eau de boisson ($0,04$ à $0,5 \mu\text{Sv}/\text{an}$).

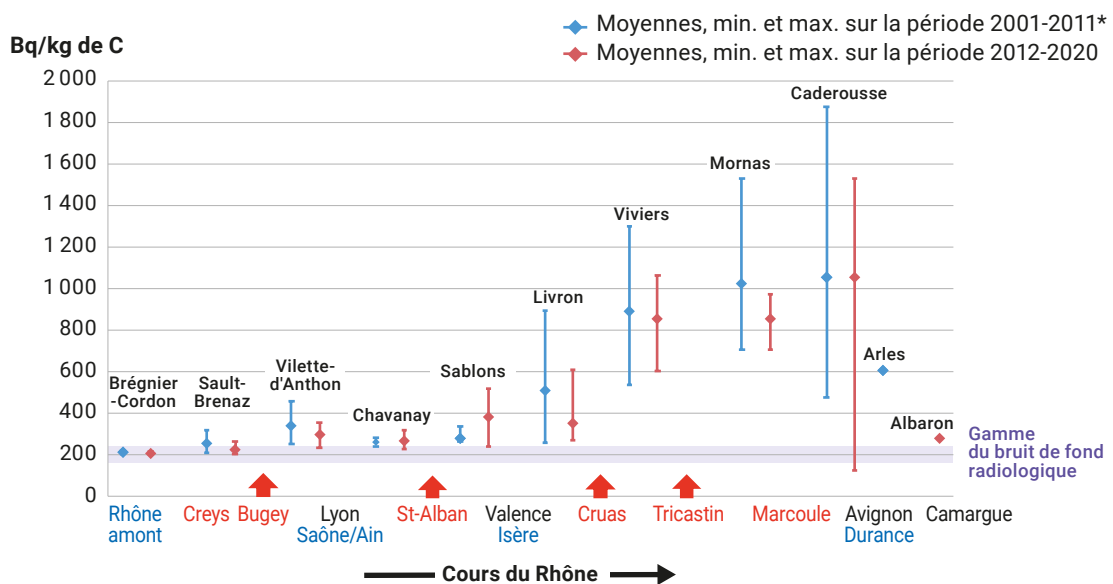
Influence du carbone-14 présent dans les rejets d'effluent liquides

L'activité en 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 en carbone-14 des poissons des cours d'eau français, soumis aux rejets de carbone-14 par voie liquide par les CNPE, conduisent à une augmentation très variable, mais néanmoins visible, contrairement aux denrées terrestres, de l'activité massique en 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). 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 mesurées en comparant les périodes 2001-2011 et 2012-2020.

En amont du site de Bugey, au niveau de Brégnier-Cordon ou Sault-Brenaz, les activités mesurées en 2017-2020 se situent dans la gamme du bruit de fond radiologique du ^{14}C dans les poissons d'eau douce français en 2019 (voir chapitre 2) : entre 200 et 237 Bq/kg de C. (19 et 24 Bq/kg frais) pour une moyenne de 211 Bq/kg de C. (22 Bq/kg frais). Les poissons pêchés entre 2017 et 2020 en aval du CNPE du Bugey présentent une activité moyenne de 281 Bq/kg de C. (27 Bq/kg frais), soit une augmentation de + 64 Bq/kg par kg de C par rapport au bruit de fond radiologique moyen (BdF). Pour une consommation annuelle de 1,3 kg de poisson par an qui correspond à celle d'un pêcheur amateur occasionnel, la dose correspondante à cette activité ajoutée serait de 0,006 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Elle atteindrait 0,02 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour les personnes consommant plus régulièrement ces poissons (5,3 kg/an). En amont de Saint-Alban, l'activité moyenne en ^{14}C des poissons diminue sensiblement sous l'effet de la dilution, notamment par les apports d'eau de l'Ain et de la Saône (267 Bq/kg de C.). Les rejets des CNPE de Saint-Alban, Cruas et Tricastin conduisent ensuite à une augmentation progressive de l'activité moyenne en ^{14}C des poissons, pêchés à aval de ces sites sur la période 2017-2020, allant de 429 Bq/kg de C. (45 Bq/kg frais), soit BdF + 211 Bq/kg de C., à 826 Bq/kg de C. (92 Bq/kg frais) soit BdF + 609 Bq/kg de C. après Tricastin.

FIGURE 8 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ EN 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 bleu) ET SUR LA PÉRIODE 2012-2020 (en rouge)



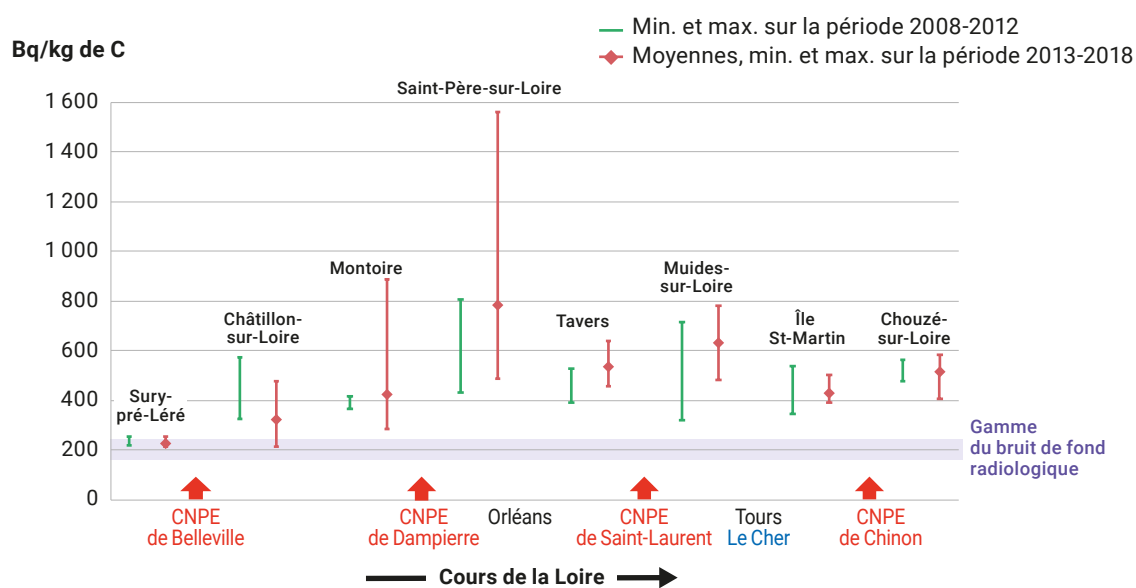
* Avant 2009, les données ne portent que sur certaines années (bilans décennaux et études spécifiques).

À ces augmentations correspondent des doses de l'ordre de 0,02 à 0,05 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un consommateur occasionnel⁽²⁾ (1,3 kg/an) et de 0,07 à 0,2 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un consommateur régulier (5,3 kg/an). Les activités moyennes mesurées en ^{14}C dans les poissons prélevés le long du linéaire rhodanien sur la période 2017-2020 sont du même ordre de grandeur que celles mesurées lors du précédent *Bilan radiologique* couvrant la période 2015-2017. Les activités maximales sont mesurées dans les poissons pêchés en aval du centre de Marcoule au niveau de Chusclan, avec une activité moyenne de 128 Bq/kg frais sur la période 2017-2020. Compte tenu des activités en carbone-14 des effluents liquides du site de Marcoule (cf. 3.4 Le site de Marcoule, p. 242), 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 en ^{14}C des poissons se rapproche ensuite du bruit de fond radiologique, notamment au niveau de la Camargue.

Une évolution similaire est observée au travers des mesures de ^{14}C faites sur des poissons de la Loire pêchés au cours de deux périodes 2008-2012 et 2013-2018 (figure 9). À Sury-Pré-Léré, en amont du CNPE de Belleville, avec une activité moyenne de 222 Bq/kg

de C (34 Bq/kg frais) sur la période 2016-2018, l'activité en ^{14}C 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 334 Bq/kg de C (45 Bq/kg frais) à l'aval de Belleville à 1 076 Bq/kg de C (156 Bq/kg frais) à l'aval de Dampierre à Saint-Père-sur-Loire et à l'aval de Saint-Laurent à Muides-sur-Loire. À cette activité maximale ajoutée de + 859 Bq/kg de C (130 Bq/kg frais) par rapport au bruit de fond, correspondrait une dose liée à la consommation de poissons de 0,07 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un consommateur occasionnel (1,3 kg/an) et 0,3 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un consommateur régulier (5,3 kg/an). La dilution, par les eaux du Cher (notamment) fait baisser l'activité en ^{14}C des poissons à 459 Bq/kg de C (74 Bq/kg frais) au niveau de l'île Saint-Martin, avant que les rejets liquides de Chinon ne la fassent augmenter de nouveau à 533 Bq/kg de C (78 Bq/kg frais) soit BdF + 316 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 mesurées sur la période 2016-2018 sont très majoritairement plus élevées à l'amont comme à l'aval des CNPE par rapport à celle du précédent bilan (2013-2015) entre + 15 et + 500 Bq/kg de C à l'aval de Belleville et Dampierre respectivement.

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



(2) À noter qu'en raison de pollutions chimiques sans liens avec les CNPE, la pêche, et donc la consommation de poisson, sont partiellement interdites dans différents tronçons du Rhône.

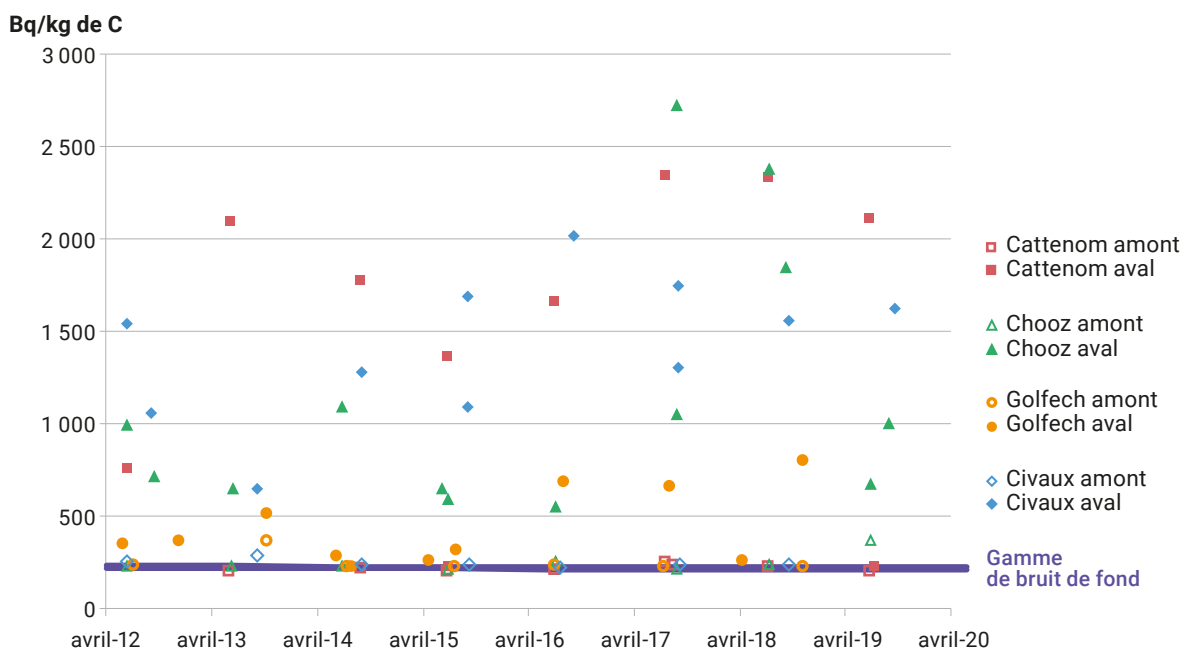
À titre d'exemple, en aval du CNPE de Dampierre, les activités mesurées entre 2016 et 2018, comprises entre 777 et 1 562 Bq/kg de C (103 à 241 Bq/kg frais), sont nettement plus élevées que celles mesurées précédemment (2013 et 2015), de 485 à 69 Bq/g de C (69 à 100 Bq/kg frais).

La figure 10 permet de comparer les activités de ^{14}C mesurées dans les poissons à l'amont et à l'aval de quelques CNPE depuis 2012. Elle montre 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 des prélèvements de 2013 à Golfech et Civaux et de 2019 à Chooz, 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 mesurées 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 mesurées dans les poissons pêchés à Saint-Sixte ou Lamagistère, entre 2016 et 2018, sont comprises entre 252 et 799 Bq/kg de C (540 et 105 Bq/kg frais) en 2018 et entre 687 et 661 Bq/kg de C en 2016 et 2017 (79 et 86 Bq/kg frais) ; ces résultats sont nettement plus élevés que ceux mesurés entre

2015 et 2017, mais de tels niveaux ont déjà été atteints par le passé (715 Bq/kg de C en 2009 par exemple). En revanche les activités en ^{14}C 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 l'aval des autres CNPE. En aval de Cattenom et de Civaux, les activités moyennes des poissons sont de 1 773 et 1 602 Bq/kg de C (195 et 187 Bq/kg frais) respectivement soit + 1 369 et + 1 550 Bq/kg de C par rapport au bruit de fond (BdF + 161 et 169 Bq/kg frais). En comparaison dans le Rhône, en aval de Tricastin, où les différents rejets des CNPE rhodaniens se cumulent, l'activité dans les poissons est de 826 Bq/kg de C (92 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 : 0,1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un consommateur occasionnel et 0,5 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ 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 2016 est de 0,2 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

FIGURE 10 / ACTIVITÉS SPÉCIFIQUES EN ^{14}C (Bq/kg de carbone) MESURÉES DEPUIS 2012 DANS LES POISSONS PÊCHÉS EN AMONT ET EN AVAVAL DES REJETS DES CNPE DE CATTENOM, CHOOZ, GOLFECH ET CIVAUX



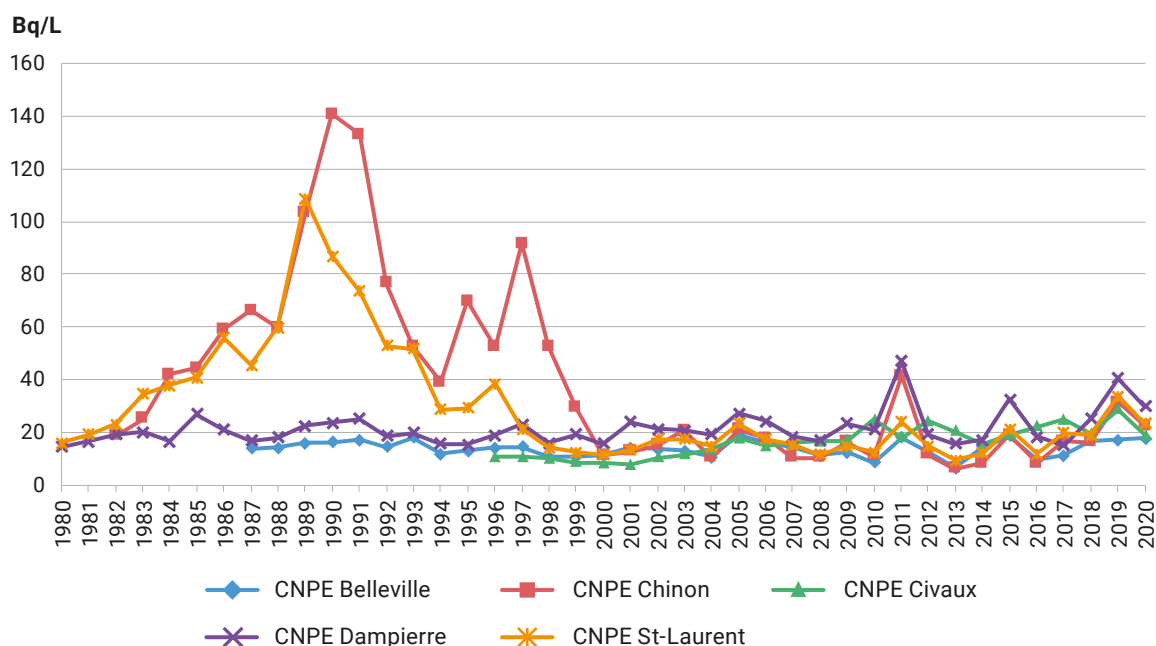
De manière plus générale, dans les précédents bilans radiologiques, 2011-2014 et 2015-2017, les doses moyennes liées à la consommation de poissons marqués par les rejets d'effluents liquides des CNPE contenant du ¹⁴C, tous sites confondus et pour un consommateur régulier (5,3 kg/an), étaient estimées à 0,12 µSv/an et 0,15 µSv/an. Cette valeur sur la période 2018-2020 est estimée à 0,2 µSv/an. Cette augmentation est cohérente avec la baisse de l'activité liée au bruit de fond radiologique et l'augmentation des activités mesurées à l'aval de plusieurs CNPE. Néanmoins la contribution du ¹⁴C provenant des rejets des CNPE à la dose consécutive à l'ingestion d'un kilogramme de poisson ne représente toujours que quelques pourcents d'une dose totale liée à la radioactivité naturelle des poissons.

Influence des rejets d'effluents liquides tritiés

L'essentiel du tritium présent dans le milieu fluvial en aval des CNPE provient des rejets d'effluents liquides des installations. La rémanence des essais atmosphériques d'armes nucléaires et la production naturelle de tritium cosmogénique (cf. chapitre 2) conduit à un « bruit de fond radiologique » de l'ordre de 0,4 à 2 Bq/L sur la période 2018-2020. Les activités mesurées à partir des échantillons prélevés de manière permanente⁽³⁾ 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 tableau 4 pour les moyennes des trois dernières années).

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

Les chroniques d'activités moyennes annuelles en tritium mesurées par l'IRSN depuis les années 1980 dans les eaux de la Loire mettent en évidence la 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. Ceci 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 en 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.



(3) Le caractère permanent est conféré par un prélèvement séquentiel ; l'activité mesurée est donc bien représentative de l'activité moyenne mensuelle (cf. chapitre 1 p. 18).

FIGURE 12 / ACTIVITÉS MOYENNES ANNUELLES EN TRITIUM DES EAUX DE LA MEUSE, DE LA MOSELLE, DU CANAL D'ALSACE ET DE LA SEINE EN AVAL DES CNPE DE CHOOZ, CATTENOM, FESSENHEIM ET NOGENT (Bq/L)

L'arrêt définitif de l'exploitation du CNPE de Chooz-A en 1991 a entraîné une forte baisse de l'activité en tritium dans la Meuse au début des années 1990, passant de 40 Bq/L à 10 Bq/L en moyenne annuelle. Depuis le milieu des années 1990, l'activité moyenne annuelle du tritium dans la Meuse fluctue entre 10 et 30 Bq/L. L'activité moyenne annuelle dans la Moselle en aval du CNPE de Cattenom est également en constante augmentation, passant de 15 Bq/L en 1985 à environ 30 à 40 Bq/L actuellement. L'activité moyenne annuelle du tritium en aval du CNPE de Fessenheim décroît régulièrement depuis 1976. L'activité moyenne annuelle mesurée depuis 2014 dans la Seine en aval du CNPE de Nogent est très fluctuante oscillant entre 15 et près de 60 Bq/L.

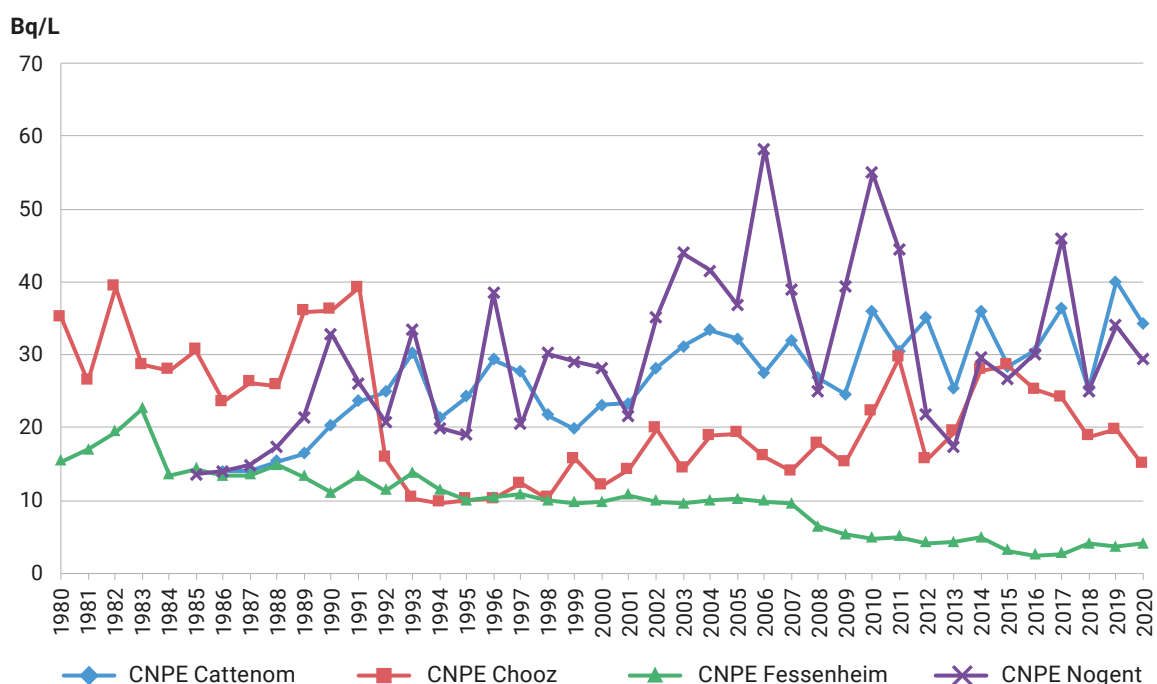


FIGURE 13 / ACTIVITÉS MOYENNES ANNUELLES EN TRITIUM DANS L'EAU DE LA GARONNE EN AVAL DU CNPE DE GOLFECH ET DE LA GIRONDE EN AVAL DE CELUI DU BLAYAIS (Bq/L)

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 (à noter qu'il s'agit d'un hydrocollecteur d'EDF dont les prélèvements sont analysés par l'IRSN). L'activité du tritium mesurée dans l'eau de la Garonne en aval de Golfech, en diminution constante depuis la fin des années 1980 est passée d'un peu plus d'une dizaine de Bq/L à 5 Bq/L. Depuis, les activités annuelles moyennes en tritium de l'eau de la Garonne prélevée en aval du CNPE de Golfech varient entre 5 et 12 Bq/L.

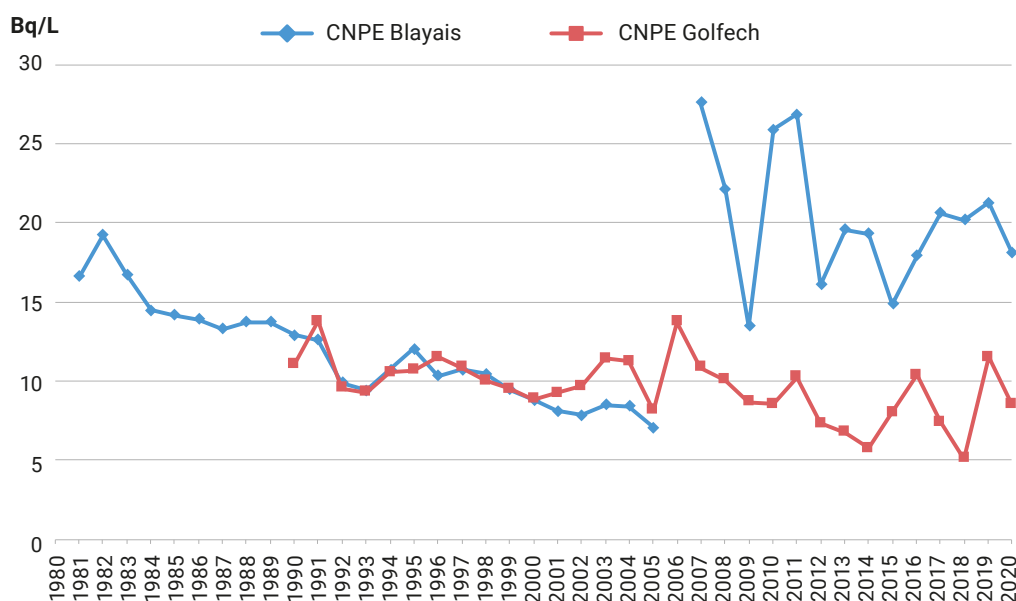
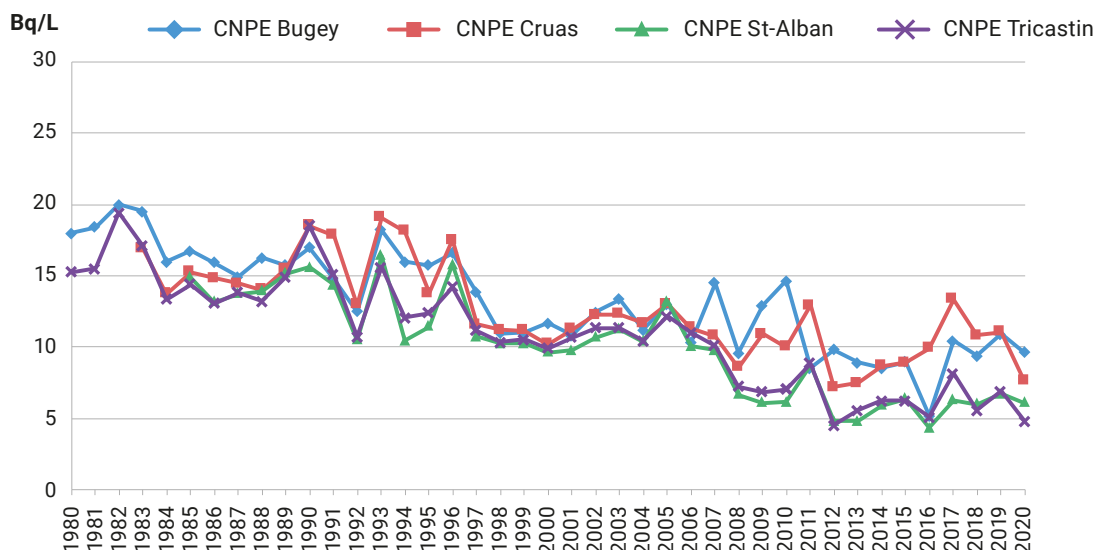


FIGURE 14 / ACTIVITÉS MOYENNES ANNUELLES DU TRITIUM DANS L'EAU DU RHÔNE EN AVAL DES CNPE DE BUGEY, SAINT-ALBAN, CRUAS ET TRICASTIN (Bq/L)

Depuis le début des années 1980, l'activité en 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). En 2017, des activités mensuelles mesurées en aval des CNPE de Cruas et de Bugey comprises entre 18 et 34,9 Bq/L ont conduit à des augmentations des activités annuelles moyennes.

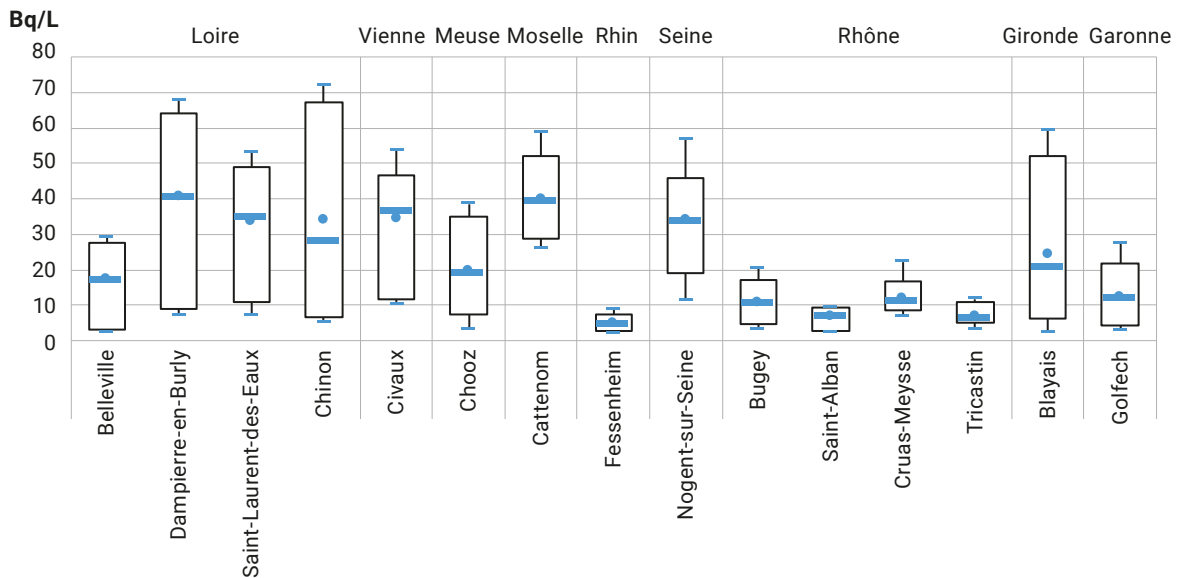


Les activités moyennes de tritium mesurées en aval des installations dans les eaux des cours d'eau récepteurs des rejets liquides en 2018-2020 sont très proches de celles mesurées lors du précédent *Bilan radiologique 2015-2017*. Ainsi, les activités moyennes annuelles les plus faibles sont mesurées dans le canal d'Alsace et dans le Rhône malgré le nombre d'installations qui y rejettent ce radionucléide : 3 Bq/L dans le canal d'Alsace en aval de Fessenheim, 6 Bq/L en aval de St-Alban et jusqu'à 11 Bq/L en aval de Cruas. Les activités dans la Loire sont comprises entre 14 Bq/L en aval de Belleville et 25 Bq/L en aval de Dampierre. C'est dans les cours d'eau de moindre débit qu'ont été mesurées les activités moyennes les plus élevées : de 33 Bq/L sur la Moselle en aval de Cattenom et 34 Bq/L sur la Seine en aval de Nogent. Ces activités mesurées 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).

Ces moyennes annuelles masquent une variabilité temporelle importante. La figure 15 présente la variabilité des moyennes mensuelles des activités de tritium mesurées dans les cours d'eau en aval des CNPE en 2019. En raison d'un débit important et relativement constant, c'est dans le Rhône et dans le Rhin que les activités mesurées mensuellement sont à la fois les plus faibles et les moins fluctuantes. C'est dans la Loire et notamment en aval des sites de Dampierre-en-Burly, Saint-Laurent-des-Eaux et Chinon, que ces fluctuations mensuelles sont les plus importantes passant de quelques Bq/L à plusieurs dizaines de Bq/L d'un mois sur l'autre.

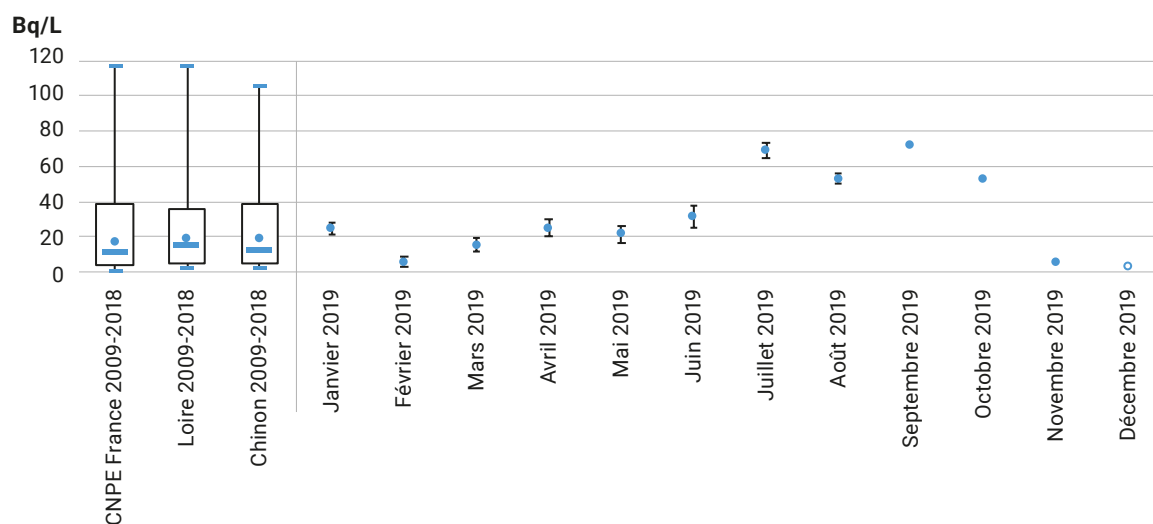
FIGURE 15 / FLUCTUATION DES MOYENNES MENSUELLES DES ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM MESURÉES DANS LES COURS D'EAU EN AVAL DES CNPE AU COURS DE L'ANNÉE 2019 (Bq/L)



Sur la période 2009-2018, les fluctuations des activités de tritium en aval des CNPE de la Loire recouvrent celles de l'ensemble des CNPE et notamment la valeur maximale mesurée de 117 Bq/L (voir les deux « boîtes-à-moustaches » de gauche de la figure 16). La figure 16 montre également cette fluctuation mensuelle à l'aval de Chinon. Ainsi, les activités mensuelles de tritium dans la Loire en aval du CNPE de Chinon sont passées de 72 Bq/L en septembre 2019, à moins de 3 Bq/L en décembre 2019 sous l'action combinée des rejets et du débit du fleuve à cet endroit. Ces moyennes mensuelles masquent également des fluctuations sans doute encore plus importantes sur des pas de temps plus courts et dans des conditions hydrologiques particulières susceptibles de générer des hétérogénéités sur la largeur du fleuve à une même distance du site (cf. chapitre 6 « Étude tritium Loire »).

Nota : des activités plus élevées en 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 tels qu'exigé par la réglementation (cf. prélèvement à mi-rejet du tableau 3-A p. 78 du BR 2015-2017) dans l'objectif de surveiller le bon déroulement des rejets d'effluents liquides. Très logiquement, les activités mesurées peuvent être en moyenne jusqu'à 6 fois supérieures à celles mesurées par l'IRSN par prélèvement continu tout au long de l'année.

FIGURE 16 / FLUCTUATION DES ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM MESURÉES MENSUELLEMENT DANS LA LOIRE EN AVAL DE CHINON TOUT AU LONG DE L'ANNÉE 2019 (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 en 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 activités rejetées. Tout au long du Rhône, la mise en perspective des activités sur les périodes 2001-2011 d'une part, et 2012-2019 d'autre part, montre la stabilité dans le temps de cette influence avec une diminution notable ces dernières années des niveaux d'activités mesurées dans les poissons pêchés en amont et en aval des CNPE. Cette tendance est très marquée à l'aval des CNPE de Cruas et Tricastin.

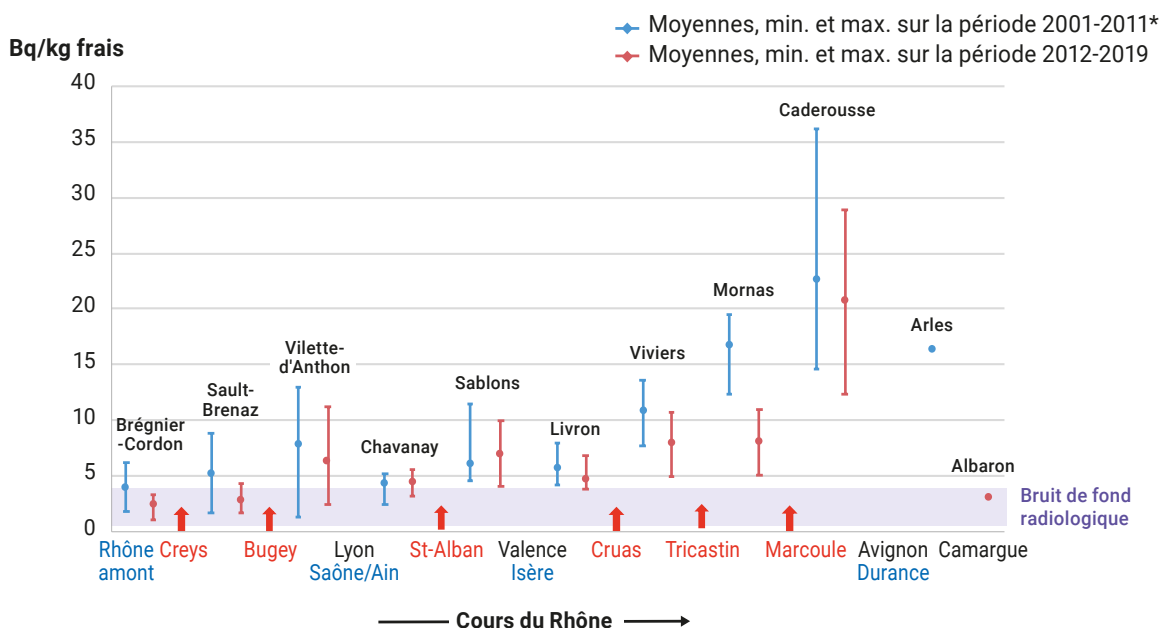
Tout au long de la Loire, la figure 18 montre la mise en perspective des activités sur les périodes 2010-2015 d'une part, et 2016-2018 d'autre part, et la stabilité dans le temps de cette influence. Avec une diminution notable ces dernières années en aval de Belleville et en amont de Chinon.

La figure 19 montre, comme pour le carbone-14 (figure 10), la plus faible capacité de la Moselle à disperser les rejets d'effluents du CNPE de Cattenom, avec des activités en aval de ce site similaires, voire supérieures à celles mesurées dans le Rhône en aval de l'ensemble des CNPE.

La dose due au tritium suite à la consommation de poisson est tout à fait négligeable au regard de celle attribuable au carbone-14 : de l'ordre de 1 000 fois inférieure.

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 EN TRITIUM DES POISSONS (Bq/kg frais), TOUT AU LONG DU COURS DU RHÔNE, ÉTABLIE SUR LA BASE DES MESURES RÉALISÉES SUR LA PÉRIODE 2001-2011 (en bleu) ET SUR LA PÉRIODE 2012-2019 (en rouge)



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

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

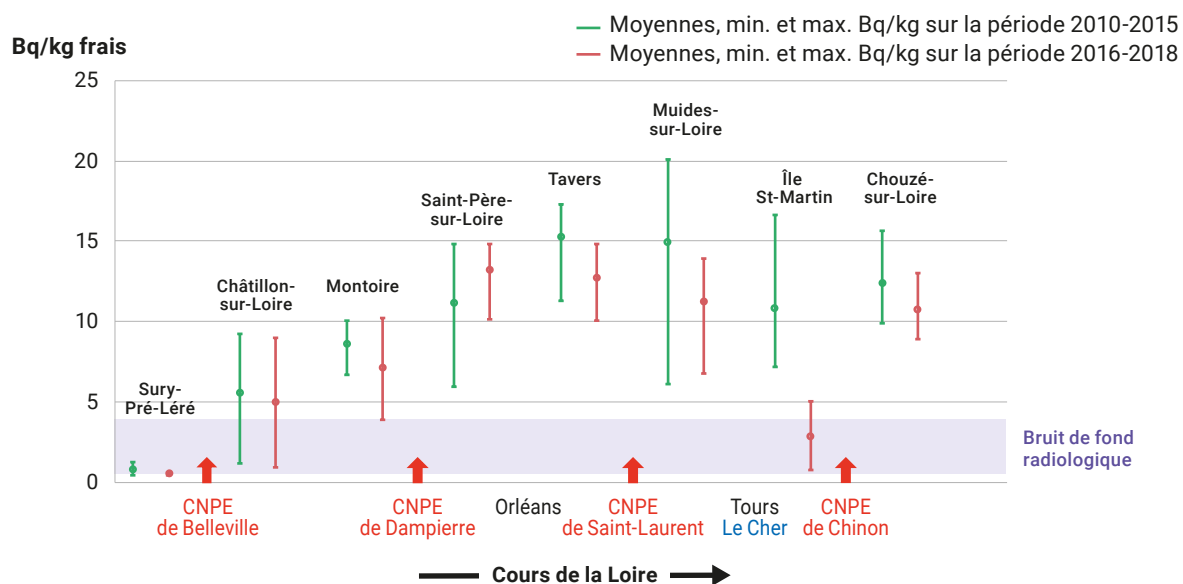
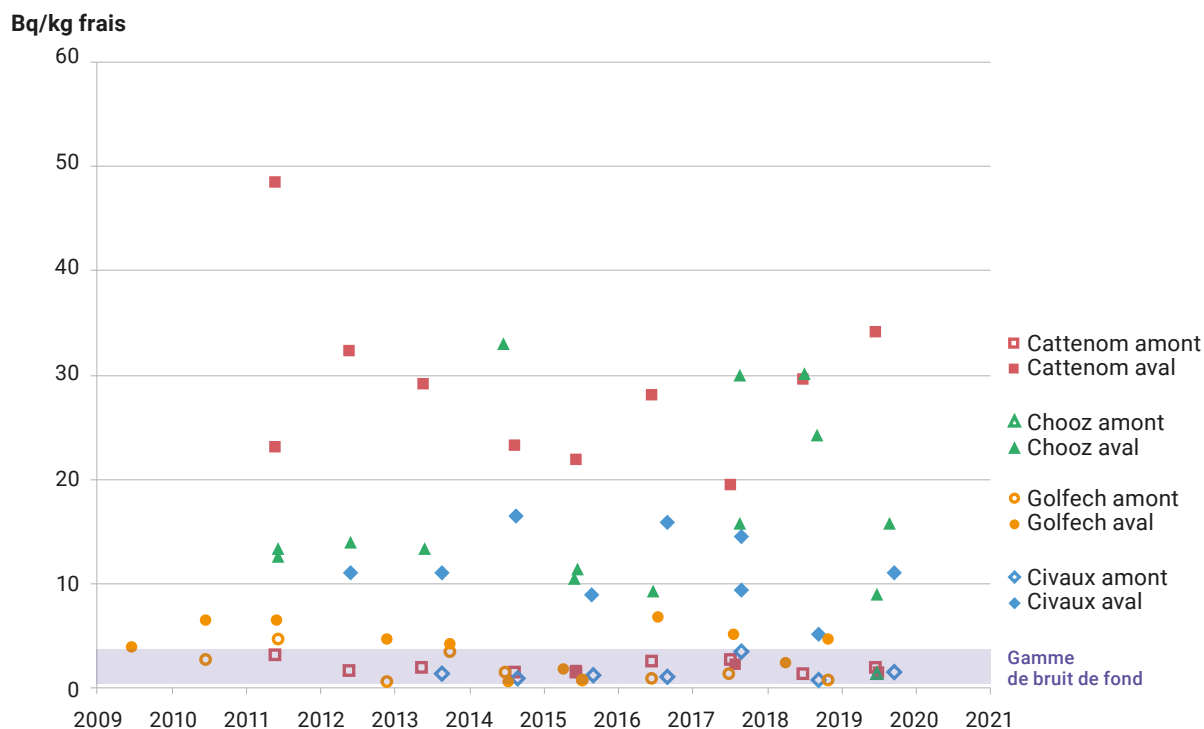


FIGURE 19 / ACTIVITÉ EN TRITIUM DES POISSONS PÊCHÉS EN AMONT ET EN AVANT DE CATTENOM, CHOOZ, CIVAUX ET GOLFECH (Bq/kg frais)



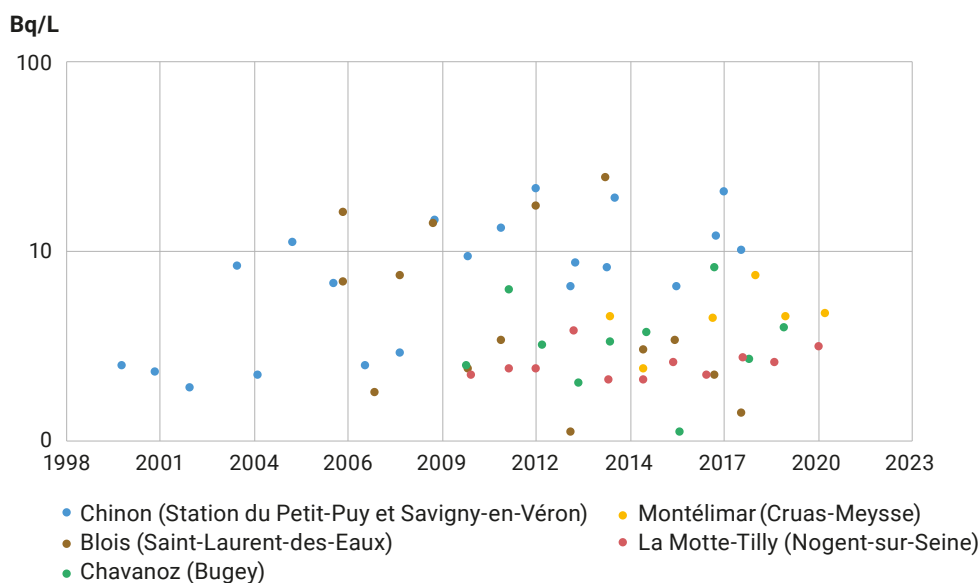
Influence des CNPE sur les activités de tritium dans les eaux de boisson et les eaux souterraines

Des activités en 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 (cf. p. 351), 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 voisin. 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 limite de potabilité du tritium dans les eaux de consommation préconisée par l'OMS est de 10 000 Bq/L.

Les événements comme ceux mentionnés ci-après sont susceptibles de faire augmenter de manière importante les teneurs en tritium des eaux souterraines situées sous les CNPE durant quelques semaines à quelques mois. Ils n'ont que très rarement de conséquences sur les eaux souterraines à l'extérieur des sites ; 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.

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 une consommation de 2 L d'eau/j sur une année, ces doses seraient de l'ordre de 0,04 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en aval de Fessenheim, 0,4 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en aval de Cattenom et 0,5 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en aval de Nogent. Ces estimations sont inférieures pour les plus élevées, à celles évaluées par EDF par calcul sur la base des activités rejetées : de 0,05 à 5 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour Fessenheim et Cattenom respectivement.

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

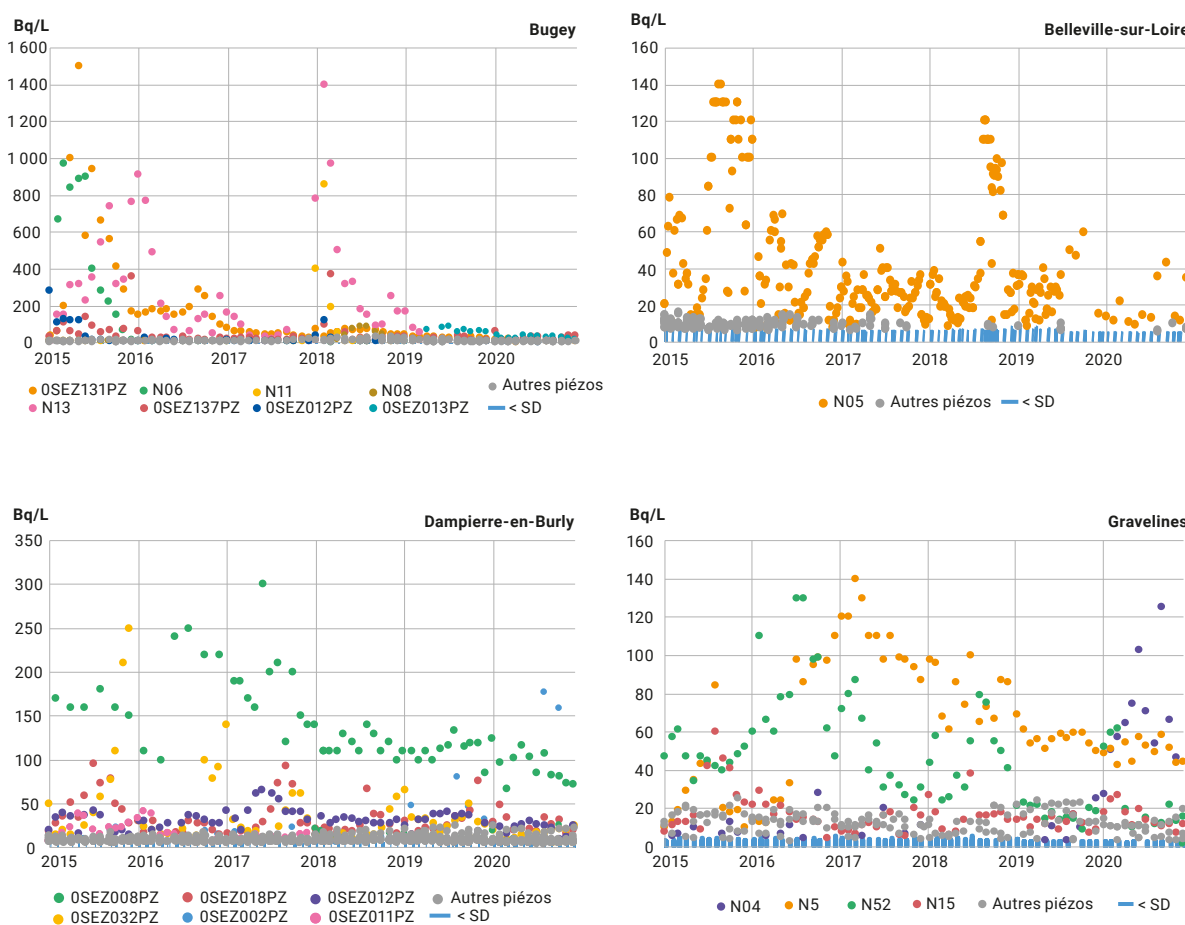


Aucun rejet n'est autorisé dans les nappes phréatiques. Par ailleurs, les natures, quantités et modalités associées aux rejets gazeux ou liquides en rivière ou en mer, rendent quasiment indécélables les marquages qu'ils pourraient induire dans les nappes. C'est pourquoi 80 % des 10 260 résultats d'analyses de tritium effectuées par EDF dans le cadre de la surveillance de routine et reportés dans le RNM pour la période 2018-2020, sont inférieurs à 10 Bq/L et 54 % sont inférieurs au seuil de décision métrologique qui se situe le plus souvent autour de 5 Bq/L. Toutefois, suite à des dysfonctionnements ou à des incidents, les eaux de nappes phréatiques échantillonnées à l'intérieur des sites d'EDF peuvent présenter temporairement des marquages en tritium (cf. *Bilans radiologiques 2011-2014* p. 78 et *2015-2017* p. 96), les transferts d'autres radionucléides dans les nappes étant très limités.

Sur la période 2018-2020, les eaux de nappes phréatiques prélevées sur au moins un des piézomètres situés à l'intérieur de l'enceinte géotechnique de 6 CNPE ont présenté des teneurs en tritium supérieures à 100 Bq/L. La figure 21 présente les activités en tritium des eaux souterraines prélevées sur l'ensemble des piézomètres mentionnés dans le RNM pour quatre de ces sites (Belleville-sur-Loire, Bugey, Dampierre-en-Burly, et Gravelines), les résultats relatifs aux deux autres sites (Cruas-Meysses et Tricastin) étant présentés et commentés dans le chapitre 6 pour illustrer une synthèse d'une étude plus générale menée par l'IRSN sur les nappes phréatiques.

Le pic d'activité en tritium observé principalement de fin 2017 à fin 2018 sur l'eau issue plus particulièrement de 3 piézomètres du site du Bugey (points bleus, jaunes

FIGURE 21 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE TRITIUM MESURÉES DANS LES EAUX SOUTERRAINES PRÉLEVÉES À L'INTÉRIEUR DE L'ENCEINTE GÉOTECHNIQUE DES CNPE DE BUGEY, BELLEVILLE-SUR-LOIRE, DAMPIERRE-EN-BURLY ET GRAVELINES DEPUIS 2015 (Bq/L)



et rouges du graphique en haut à gauche), fait suite à une inétanchéité de caniveaux déclarée par EDF à l'ASN. L'activité maximale de 1 400 Bq/L a été mesurée sur le piézomètre N13 (point bleu) début février 2018. Il est difficile de dire si le pic d'activité de plus faible ampleur décelé à partir de ce même piézomètre en septembre 2019 (max de 250 Bq/L) est toujours lié à cet événement ou s'il résulte de problèmes d'étanchéité observés sur un puisard et déclarés par EDF à l'ASN en juillet 2019. Le pic d'activité observé sur la période 2015-2017 a, quant à lui, été commenté en page 96 du *Bilan radiologique* précédent portant sur cette période.

Dans le cas de Belleville-sur-Loire, seul un piézomètre a été concerné par une augmentation du tritium dans l'eau souterraine qui a atteint un maximum de 120 Bq/L en août 2018. Il faut noter que l'activité volumique de tritium a toujours fluctué dans l'eau issue de ce piézomètre depuis un marquage initial datant de 2000. Toutefois, elle n'avait pas dépassé 100 Bq/L depuis 2015.

En ce qui concerne Gravelines, l'augmentation de l'activité volumique de tritium des eaux du piézomètre N04 en 2020 (points bleus), pourrait être reliée à la présence d'effluents tritiés dans le caniveau d'une tuyauterie, événement déclaré par EDF à l'ASN en mars 2020. Les activités de tritium de quelques dizaines de Bq/L observées sur l'ensemble de la période 2018-2020 au niveau des piézomètres N5 (points orange) et N52 (points verts) sont le reliquat d'un événement survenu avant 2015.

La situation est similaire dans le cas de Dampierre-en-Burly, avec un marquage de la nappe en tritium visible notamment sur les eaux des piézomètres 0SEZ008PZ (points verts) et 0SEZ032PZ (points jaunes), en diminution depuis un événement antérieur à la période et qui avait fait l'objet d'une déclaration d'événement par EDF à l'ASN. Les activités de tritium de 176 Bq/L et 158 Bq/L mesurées en août et octobre 2020 sur les eaux du piézomètre 0SE002PZ (points bleus), pourraient être reliées à l'événement décelé en septembre 2020 et déclaré par EDF à l'ASN.

En dehors des marquages mentionnés ci-dessus et ceux mentionnés dans la synthèse du chapitre 6, aucun des autres événements déclarés par EDF sur la période 2018-2020 n'a eu pour conséquence une augmentation mesurée de l'activité de tritium dans les eaux souterraines sur les sites concernés.

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 particulaires dans les cours d'eau (d'autres comme le tritium ou les antimoinés 124 et 125 se présentent sous forme dissoute). Comme pour la période 2014-2017, les principaux radionucléides émetteurs gamma qui composent les rejets d'effluents liquides des CNPE ont tous été détectés au moins une fois sur la période 2018-2020. Comme attendu, le cobalt-60, qui est le plus rejeté, est aussi le plus fréquemment détecté (47 % des analyses) dans les boues des hydrocollecteurs de l'IRSN, avec les activités les plus élevées (jusqu'à 36 Bq/kg sec). Il est suivi, comme pour les rejets, de l'argent-110m (32 % de détection avec une activité maximale de 36 Bq/kg sec) et du cobalt-58 (17 % de détection avec une activité maximale de 16 Bq/kg sec). Le manganèse-54 et le césium-134, beaucoup moins rejetés par les CNPE, ne sont détectés que rarement (respectivement 3 % et 0,9 % des analyses avec des activités maximales de 3,4 et 2,3 Bq/kg sec). La forte fréquence de détection du césium-137 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 110 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. Enfin, il faut noter que du ruthénium 106 a été mesuré cinq fois, entre 4 et 13 Bq/kg sec et du cobalt-57 par deux fois à l'état de trace (0,12 et 0,14 Bq/kg sec) dans les boues de décantation des hydrocollecteurs, en 2018 et 2020, dans le bassin de rejet du CNPE de Flamanville. La détection de ces radionucléides est vraisemblablement liée à l'influence des rejets du site de la Hague, via l'eau de mer utilisée pour disperser les rejets du CNPE de Flamanville.

Des radionucléides émetteurs gamma issus des rejets liquides des CNPE, autres que le césium-137 et l'iode-131, sont également décelés dans certains indicateurs biologiques (plantes aquatiques), très rarement dans les sédiments, jamais dans les poissons ces dernières années, et seulement au moyen des meilleures techniques disponibles mises en œuvre dans le cadre des études réalisées par l'IRSN et SUBATECH à la demande d'EDF. Il s'agit régulièrement du ^{60}Co et du ^{58}Co , ponctuellement du ^{54}Mn et de l' $^{110\text{m}}\text{Ag}$, et plus rarement du ^{134}Cs . Les figures 22A, 22B et 23 présentent les activités de ^{60}Co et ^{58}Co 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 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 les activités mesurées entre 2018 et 2020 en aval de Bugey sont nettement moins élevées que les années précédentes. 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.

FIGURE 22A / ACTIVITÉS EN COBALT-58 ET COBALT-60 DES PLANTES AQUATIQUES (mousses et phanérogames) COLLECTÉES EN DIFFÉRENTS POINTS DU RHÔNE (Bq/kg frais)

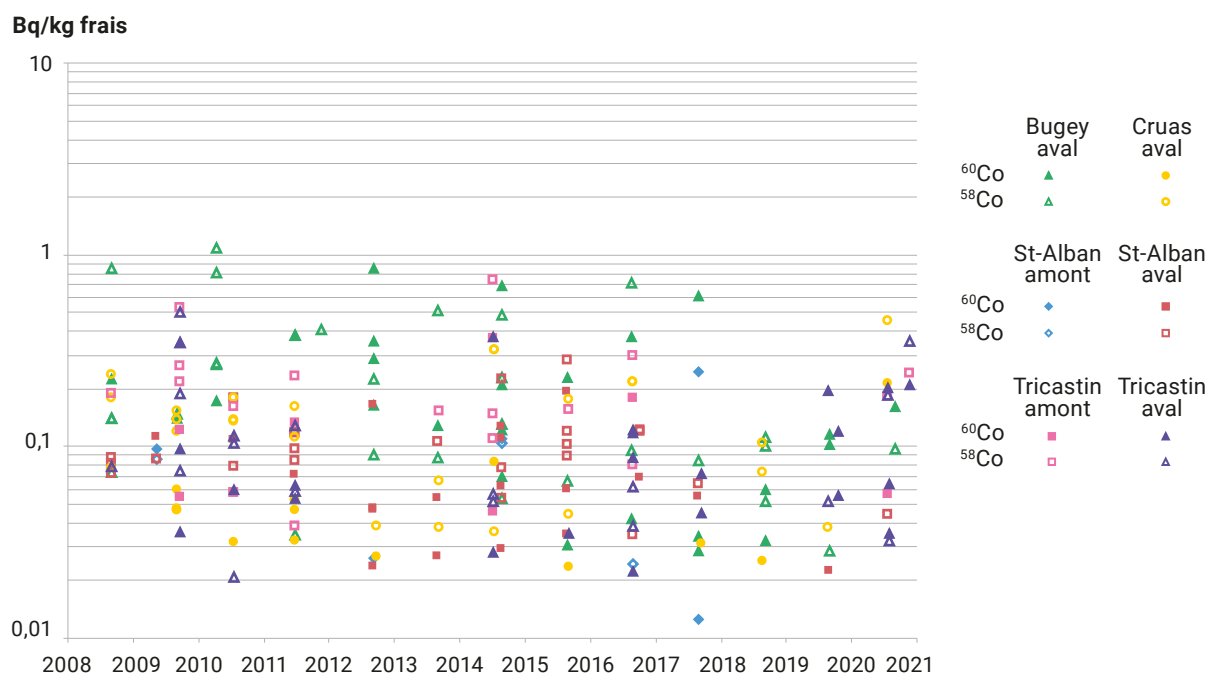


FIGURE 22B / ACTIVITÉS EN COBALT-58 ET COBALT-60 DES PLANTES AQUATIQUES (mousses et phanérogames) COLLECTÉES EN DIFFÉRENTS POINTS DE LA LOIRE (Bq/kg frais)

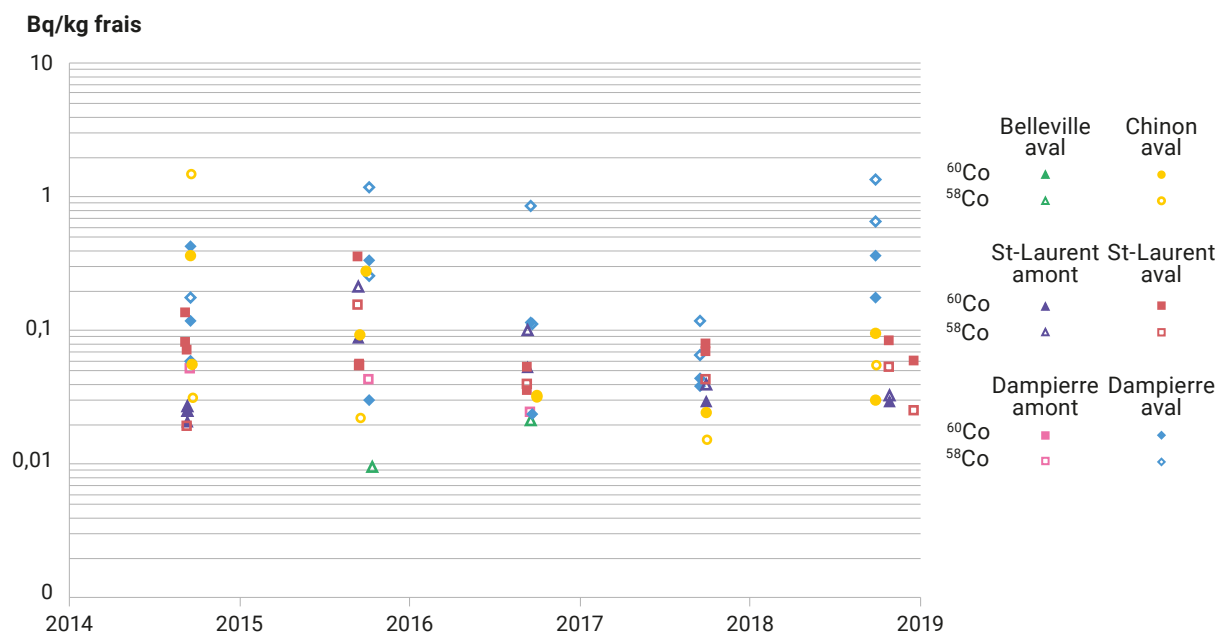
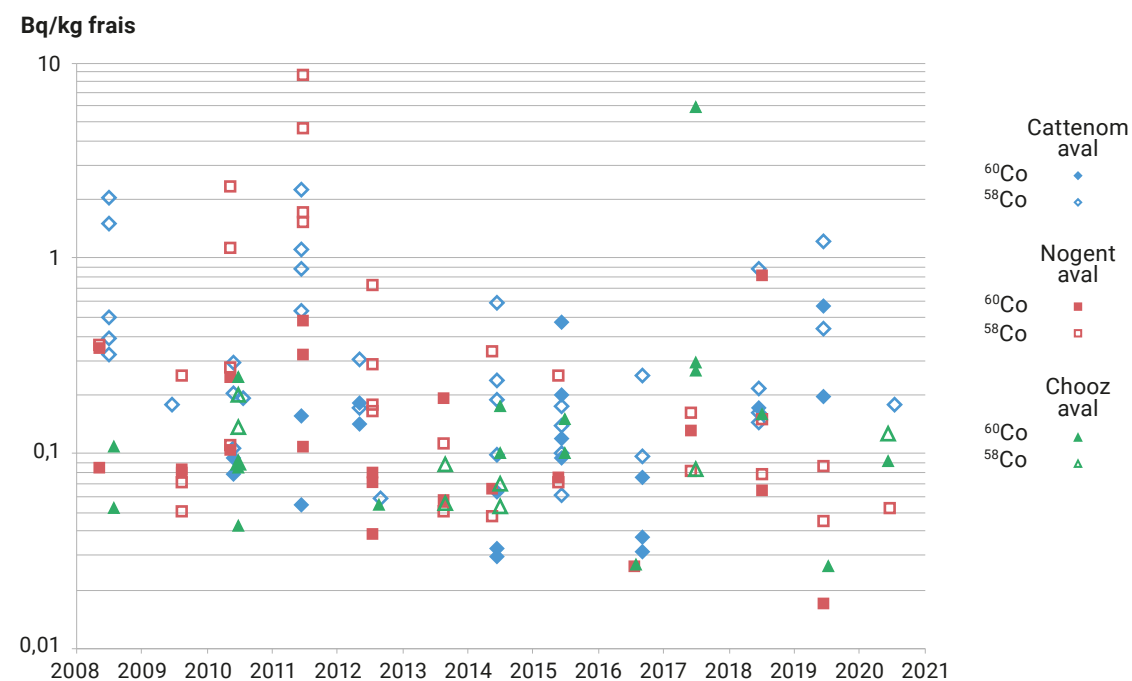


FIGURE 23 / ACTIVITÉS EN COBALT-58 ET COBALT-60 DES PLANTES AQUATIQUES (mousses et phanérogames) DANS LA SEINE, LA MEUSE ET LA MOSELLE EN AVAL DES CNPE DE NOGENT, CHOOZ ET CATTENOM (Bq/kg frais)



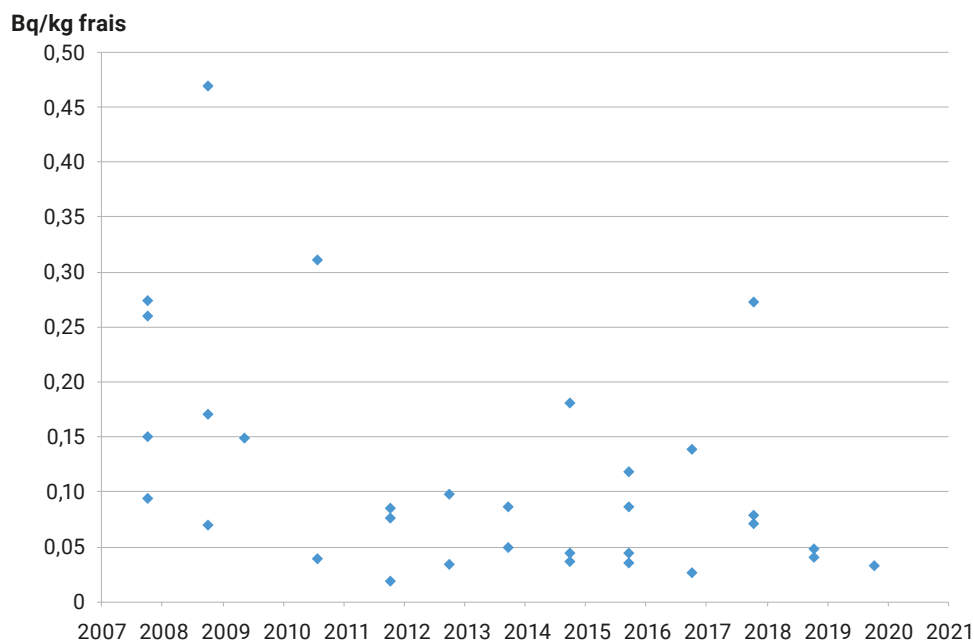
C'est également en aval du Bugey que de l'^{110m}Ag est le plus souvent décelé (figure 24). Dans ces composantes du milieu aquatique, de l'iode-131 peut être mesuré irrégulièrement et à des niveaux très variables. Comme pour les boues de décantation, la présence de ce radionucléide résulte principalement des rejets hospitaliers qui sont à rapprocher des utilisations thérapeutiques et diagnostiques de ce radionucléide.

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, cf. chapitre 3.3 La Hague). La contribution vraisemblablement très faible des rejets d'effluents liquides des CNPE n'est pas distinguable par la mesure, à l'exception du ^{110m}Ag 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 pouvant atteindre quelques Bq/kg de matière sèche (valeur maximale de 2,9 Bq/kg sec mesurée dans le canal marin de Gravelines en septembre 2014).

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, depuis 2018, sur 86 analyses d'algues et 73 analyses de sédiments ou de sables prélevés en Manche, seulement 1 échantillon d'algues (*fucus*) prélevé au port de Diélette en janvier 2018 et 2 échantillons de sables de plages prélevés près des CNPE de Penly en juin 2018 et de Gravelines en février 2019, présentaient des teneurs en argent-110m mesurables de 0,17, 0,53 et 0,2 Bq/kg sec respectivement. De même, les 286 analyses effectuées depuis 2001 dans les poissons n'ont jamais permis de quantifier l'activité de l'^{110m}Ag 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 25 présente les résultats acquis sur l'ensemble des denrées prélevées autour des sites de Flamanville, Paluel et Gravelines (autour de Penly les activités sont plus faibles et très rarement mesurables). Les activités sont presque toutes comprises entre 0,01

FIGURE 24 / ACTIVITÉS EN ARGENT-110m DANS LES PLANTES AQUATIQUES (mousses et phanérogames) DU RHÔNE EN AVAL DU CNPE DU BUGEY (Bq/kg frais)



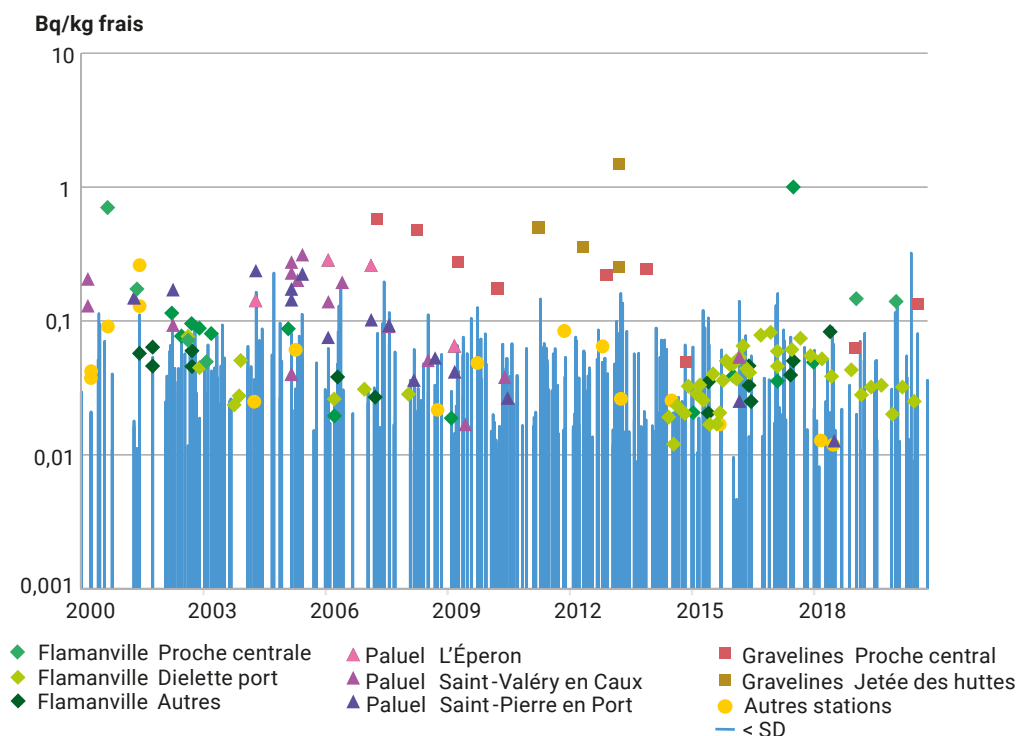
et 1 Bq/kg frais, avec des fluctuations très importantes au niveau d'une même station de prélèvement. L'activité la plus élevée mesurée au cours des 20 dernières années est de 1,5 Bq/kg frais dans des patelles prélevées à la jetée de Huttes en 2013, à proximité immédiate du CNPE de Gravelines, où sont 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 de ^{110m}Ag sur la base de tous les résultats acquis au cours des 20 dernières années, serait très faible : le plus souvent inférieures à 0,01 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, comprise entre 0,01 à 0,04 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ si ces denrées proviennent des environs de Diélette, Saint-Valéry-en-Caux, Saint-Pierre-en-Port ou encore l'Éperon à Paluel et jusqu'à 0,05 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ si elles proviennent des environs immédiats du CNPE de Gravelines. Cette dernière dose est du même ordre quoique inférieure à celles estimées par EDF par calcul sur la base des activités rejetées par le site de Gravelines en 2016 : 0,08 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un consommateur moyen et 0,16 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un gros consommateur.

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 2018-2020, une seule anomalie a été décelée. Il s'agit d'une activité volumique de cobalt-60 dans l'air, de l'ordre de 10 fois 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 Gravelines et couvrant la période du 16 au 23 avril 2018. Bien que des hypothèses aient été émises (conditions météorologiques particulières, remise en suspension de poussières générées par des travaux, embruns venant du canal...), il n'a pas été possible de conclure sur l'origine de cette valeur anormale. Par ailleurs, tous les dépassements de l'indice d'activité bêta global de référence dans l'air (2 mBq/m³) observés sur la période, sont attribuables à des augmentations de la radioactivité naturelle (plomb-210 principalement), en relation avec des conditions météorologiques particulières.

FIGURE 25 / ACTIVITÉS EN ARGENT-110m MESURÉES DANS DES MOLLUSQUES ET DES CRUSTACÉS PRÉLEVÉS EN MANCHE À PROXIMITÉ DES CNPE DEPUIS 2000 (Bq/kg frais)



Parmi les résultats de mesure acquis dans l'environnement des CNPE par l'ensemble des acteurs de la surveillance, il faut mentionner une activité volumique de tritium inhabituellement élevée de 310 Bq/L, mesurée par l'ACRO dans un prélèvement ponctuel d'eau de la Loire au niveau de Saumur en aval du CNPE de Chinon. Une synthèse des investigations menées par l'IRSN suite à ce résultat de mesure est présentée dans le chapitre 6 relatif aux événements intervenus sur la période 2018-2020.

Sept des neuf événements significatifs déclarés par EDF sur la période 2018-2020 pour l'ensemble des CNPE, et susceptibles, selon l'IRSN, d'avoir eu des conséquences pour l'environnement, pouvaient potentiellement concerner le tritium dans les eaux souterraines. Les activités volumiques de tritium dans les eaux prélevées au niveau des piézomètres situés sur les sites concernés sont présentées et commentées dans le paragraphe correspondant du présent bilan. Les deux autres événements déclarés par EDF concernent, d'une part un rejet d'iode non filtré par le piège à iode en janvier 2018 sur le CNPE de Penly, et d'autre part une détection anormale de cobalt-60 sur un filtre d'effluents atmosphériques pour la période du 15 au 25 mars 2019 au CNPE de Dampierre-en-Burly. Ces deux événements n'ont pas eu de conséquences dans l'environnement mesurables au travers de la surveillance réglementaire.

À l'exception de la mesure de cobalt-60 mentionnée dans le premier alinéa de cette conclusion, les activités mesurées dans toutes les composantes de l'environnement autour des CNPE au cours des années 2018-2020 sont conformes à celles attendues. Elles sont assez constantes par rapport aux années précédentes. Le carbone-14 et le tritium, qui sont les deux radionucléides les plus abondants dans les rejets d'effluents, 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 à 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 0,09 µSv/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 0,2 µSv/an. Cette dose peut être plus élevée en aval de certains sites et atteindre 0,5 µSv/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 estimée à 12 µSv/an.

La consommation d'eau d'origine fluviale en aval des CNPE conduirait à une dose comprise entre 0,004 µSv/an et 0,5 µSv/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 (⁶⁰Co et ^{110m}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 ¹³⁷Cs 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 (cf. chapitre 2).

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 pour le bilan précédent relatif à la période 2015-2017 ; ceci 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 ses rapports annuels. 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 de 1 mSv/an.

Ces doses sont également à mettre en perspectives de celles dues au bruit de fond radiologique français (cf. chapitre 2).

3.2. LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN COURS DE DÉCONSTRUCTION

Neuf réacteurs d'EDF sont actuellement en cours de déconstruction. Les sept d'entre eux qui se trouvent adossés à des sites où des réacteurs sont en exploitation ou récemment mis à l'arrêt (Fessenheim) sont traités dans le chapitre 3.1. Le présent chapitre ne présente donc que les deux sites où aucun réacteur n'est en exploitation : Creys-Malville et Brennilis.

Le site de Creys-Malville

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

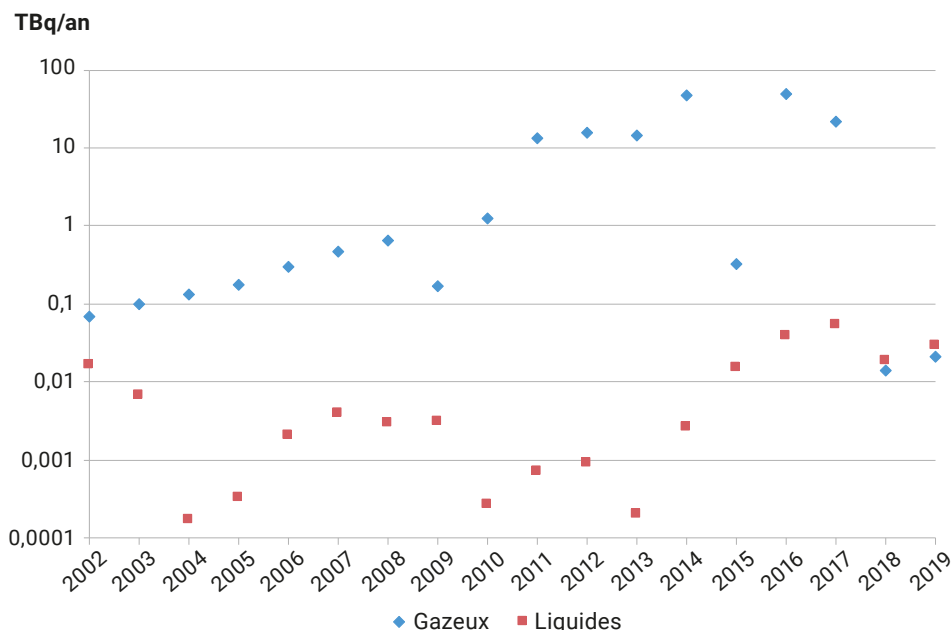
Rejets et surveillance de l'environnement

Conformément à la réglementation, le site de Creys-Malville dispose d'une autorisation spécifique pour rejeter des substances radioactives dans l'environnement. Les effluents radioactifs liquides proviennent du rejet d'une partie de l'eau utilisée dans les installations. Les effluents radioactifs gazeux proviennent eux de la ventilation des bâtiments. Le tritium constitue l'essentiel des activités rejetées : de 98 à 99,9 % des rejets liquides et gazeux. Le tableau 1 présente les activités rejetées pour la période de 2011 à 2019 et la figure 1 présente l'évolution des rejets de tritium sous forme gazeuse et liquide de 2002 à 2019. On note que les rejets liquides augmentent régulièrement depuis 2011 et ont atteint un maximum de 0,055 TBq en 2017. Concernant les rejets gazeux, on constate la hausse régulière des rejets tritiés de 2002 à 2017 avec un maximum de 48,3 TBq en 2016. Les variations à la hausse ou à la baisse des rejets en tritium sont liées aux opérations spécifiques de démantèlement. Depuis le 26 août 2017, la limite annuelle de rejets gazeux en tritium à la cheminée EBA a diminué et est passée de 98 TBq/an à 2 TBq/an conformément à l'article 11 de l'arrêté du 3 août 2007 autorisant EDF à poursuivre les prélèvements d'eau et les rejets d'effluents liquides et gazeux pour l'exploitation du site nucléaire de Creys-Malville. À cette date, les opérations de démantèlement conduisant à des rejets importants de tritium (traitement des pièges froids et cartouches UPI, traitement des enveloppes UPI, carbonatation de la cuve) étaient achevées. Depuis le second semestre 2017, les opérations de démantèlement génèrent des rejets de tritium à de faibles niveaux ; en 2018 et 2019, ces rejets ont fortement diminué à 0,014 et 0,021 TBq/an respectivement.

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS REJETÉES PAR LES INSTALLATIONS DE CREYS-MALVILLE POUR LA PÉRIODE DE 2011 À 2019

	Unité	Activité rejetée								
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Rejets radioactifs liquides										
Tritium	TBq	0,72.10 ⁻³	0,91.10 ⁻³	0,2.10 ⁻³	2,63.10 ⁻³	1,53.10 ⁻²	3,86.10 ⁻²	5,49.10 ⁻²	1,85.10 ⁻²	2,88.10 ⁻²
Hors Tritium	GBq	7,7.10 ⁻³	1,72.10 ⁻²	1,7.10 ⁻²	1,49.10 ⁻²	1,98.10 ⁻²	4,19.10 ⁻¹	2,04.10 ⁻¹	4,31.10 ⁻²	3,56.10 ⁻²
Rejets radioactifs gazeux										
Tritium	TBq	13,32	15,73	14,85	47,9	3,26.10 ⁻¹	48,3	22	1,4.10 ⁻²	2,13.10 ⁻²
Produits de fission ou d'activation	GBq	1,5.10 ⁻³	1,5.10 ⁻³	3,2.10 ⁻³	5,37.10 ⁻³	2,43.10 ⁻³	2,31.10 ⁻³	2,22.10 ⁻³	2,21.10 ⁻³	2,4.10 ⁻³
Gaz rares (⁸⁵ Kr)	GBq	2,7.10 ⁻¹	5.10 ⁻²	5.10 ⁻²	2,25.10 ⁻²	2,4.10 ⁻²	3,75.10 ⁻²	-	-	-

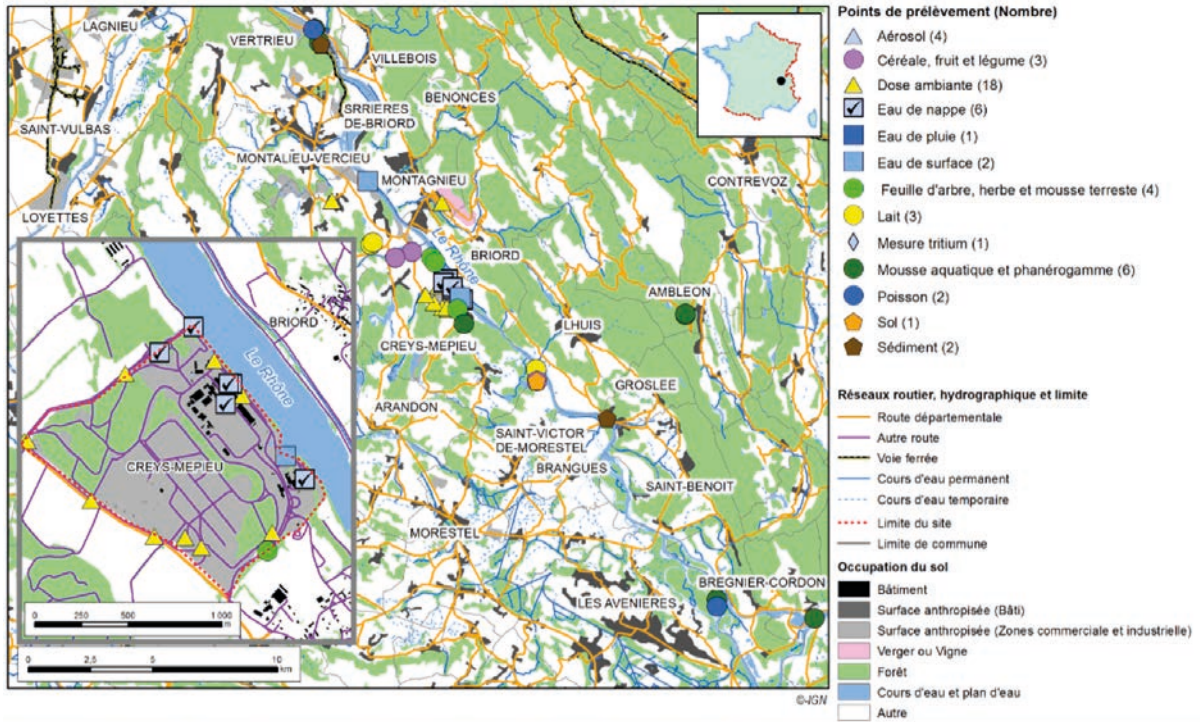
FIGURE 1 / ÉVOLUTION DES REJETS DE TRITIUM DU SITE DE CREYS-MALVILLE SOUS FORME GAZEUSE ET LIQUIDE DE 2002 À 2019 (TBq/an)



Comme mentionné au chapitre 1 p. 6, 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 autorisant Électricité de France à poursuivre les prélèvements d'eau et les rejets d'effluents liquides et gazeux pour l'exploitation du site nucléaire de Creys-Malville. 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 les objectifs 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 des rejets sur l'environnement. Des études radio-écologiques annuelles confiées par EDF à l'IRSN viennent en complément des mesures réalisées 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. Le plan de surveillance de l'IRSN est identique à celui des CNPE en exploitation à quelques nuances près.

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



Le site de Creys-Malville

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

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Mesure, prélèvements et analyses
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
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> • 4 points de prélèvement et mesures quotidiennes de l'activité bêta 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 bi-mensuelle de l'activité bêta globale et du tritium
Milieu récepteur des rejets liquides	<ul style="list-style-type: none"> • Aliquote horaire prélevée à mi-rejet : activité bêta globale, potassium et tritium sur eau filtrée + activité bêta 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
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> • 6 points de prélèvement : mesures mensuelles de l'activité bêta globale, du ⁴⁰K et du ³H sur l'eau filtrée et activité bêta globale sur MES
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 + HTO et TOL annuel
Lait	<ul style="list-style-type: none"> • 2 échantillons mensuels de lait (dont 1 sous les vents dominants) : spectrométrie γ mensuelle + mesure tritium trimestrielle
Sol	<ul style="list-style-type: none"> • 1 prélèvement annuel : spectrométrie γ
Productions agricoles	<ul style="list-style-type: none"> • 1 prélèvement annuel des principales productions agricoles : spectrométrie γ, HTO, TOL
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

TABLEAU 2B / PLAN DU SUIVI RADIOÉCOLOGIQUE ANNUEL DEPUIS 2018, RÉALISÉ PAR L'IRSN ET SUBATECH 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	⁵⁵ Fe
Sol de prairie	1	1	1				
Herbe	1	1	1				
Lait	1	8	1				
Mousse terrestre	2			2			
Feuille de chênes		2	2		2		
Productions agricoles	3	2	2				
Sédiment	2		2		2	2	2
Mousse aquatique	2					2	2
Phanérogames aquatiques	2	2	2	2	2		
Poissons	2	1	2		2		

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

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 en tritium total mesurées dans l'air par EDF de juin 2011 à juillet 2019 ainsi que les activités en HT et en HTO mesurées dans l'air par EDF d'août 2019 à novembre 2020. On note que la diminution des rejets de tritium atmosphérique depuis 2018 par rapport aux années précédentes se traduit par une absence de mesure significative comme cela avait été le cas en 2015. Les opérations de démantèlement qui généraient des « bouffées » de rejets atmosphériques de tritium (principalement sous sa forme HT) étant achevées depuis 2017, les activités de tritium mesurées à la station AS1 à proximité du site de Creys-Malville depuis août 2019 sont toutes inférieures aux seuils de décision.

La figure 4 présente les activités en tritium mesurées dans l'eau de pluie, par EDF et l'IRSN, sur le site de Creys-Malville de juin 2011 à novembre 2020. Depuis 2011, sur 259 mesures, 94 % se situent en dessous des seuils de décision (autour de 4 à 5 Bq/L). Seules 19 mesures ont des valeurs significatives comprises entre 1,94 (mai 2018) et 16,5 Bq/L (octobre 2012).

Les résultats de mesure significatifs observés sur la période 2018-2020 sont compris entre 1,94 Bq/L et 3,93 Bq/L et sont à comparer au niveau du bruit de fond actuel qui est de l'ordre de 1 Bq/L d'eau de pluie, dans une gamme allant de 0,5 à 2 Bq/L.

L'influence des rejets de tritium par le site de Creys-Malville est assez peu visible au travers des mesures effectuées dans le compartiment terrestre. Les activités moyennes en tritium mesurées dans le cadre des études radioécologiques entre 2018 et 2020 dans l'herbe (0,99 Bq/kg frais), les légumes (1,19 Bq/kg frais), les céréales (1,11 Bq/kg frais) et le lait (1,04 Bq/kg frais) sont faibles et s'inscrivent dans la gamme du bruit de fond du tritium environnemental (entre 0,5 et 2 Bq/L sur la période 2018-2020). Ces moyennes sont plus faibles que celles estimées dans le précédent bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2015 à 2017 (3,39 Bq/kg frais pour l'herbe, 1,93 Bq/kg frais pour les légumes, 1,2 Bq/kg frais pour les céréales et 1,51 Bq/kg frais pour le lait).

Plus de 99 % des mesures de tritium dans l'eau du Rhône prélevée en aval du site de Creys-Malville sont inférieures aux seuils de décision (figure 5). Quelques mesures significatives montrent des activités en tritium autour de 2,5 à 3 Bq/L, inférieures aux activités estimées dans le précédent bilan de l'état radio-

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DU TRITIUM TOTAL, MESURÉ JUSQU'EN JUILLET 2019, DE L'HYDROGÈNE TRITIÉ (HT) ET DE LA VAPEUR D'EAU TRITIÉE (HTO), MESURÉS DEPUIS AOÛT 2019, DANS L'AIR AUTOUR DU SITE DE CREYS-MALVILLE DE JUIN 2011 À NOVEMBRE 2020

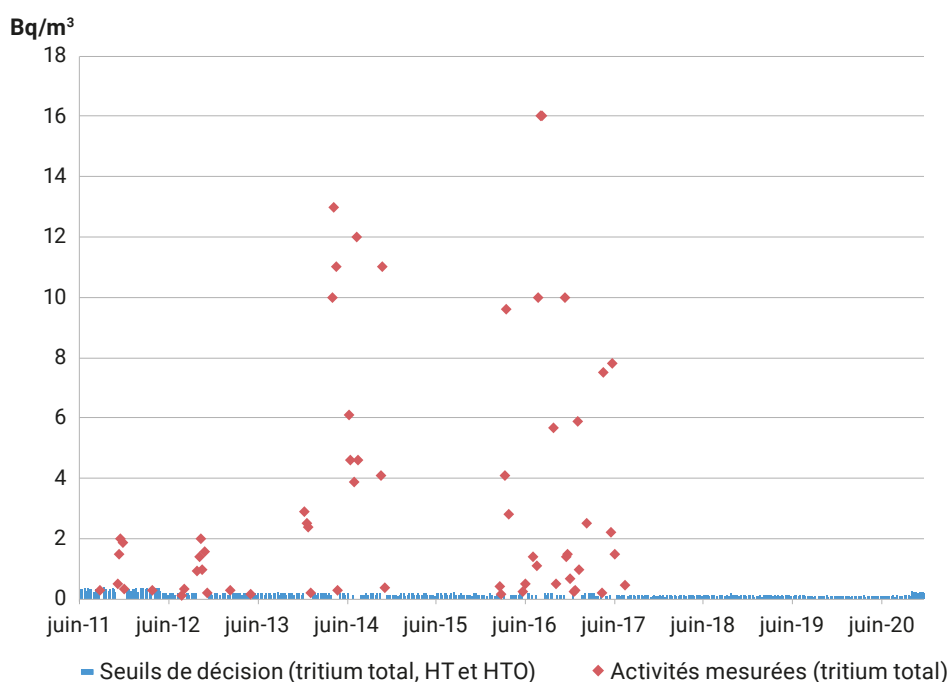


FIGURE 4 / ACTIVITÉS DU TRITIUM MESURÉES DANS L'EAU DE PLUIE AUTOUR DU SITE DE CREYS-MALVILLE DE JUIN 2011 À NOVEMBRE 2020

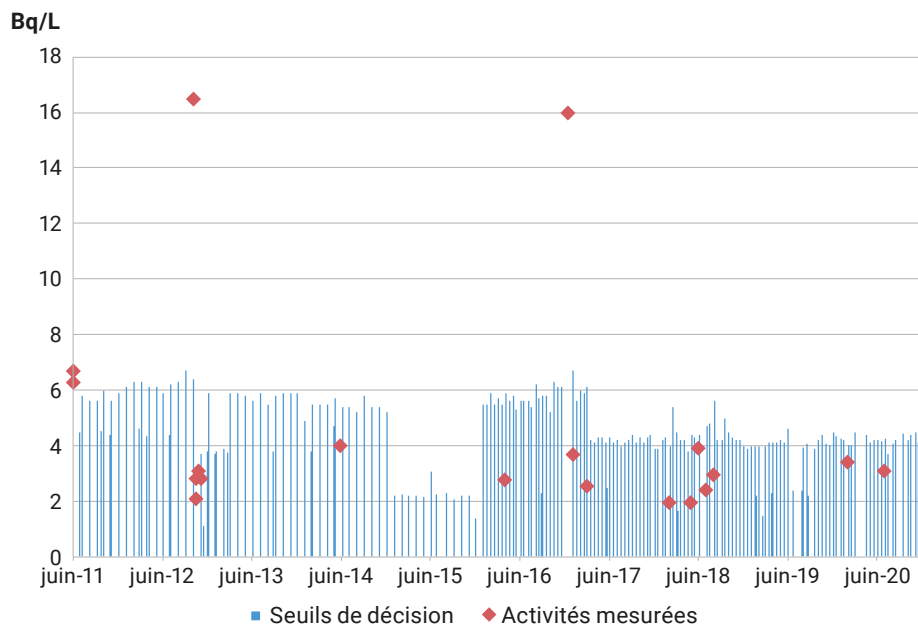
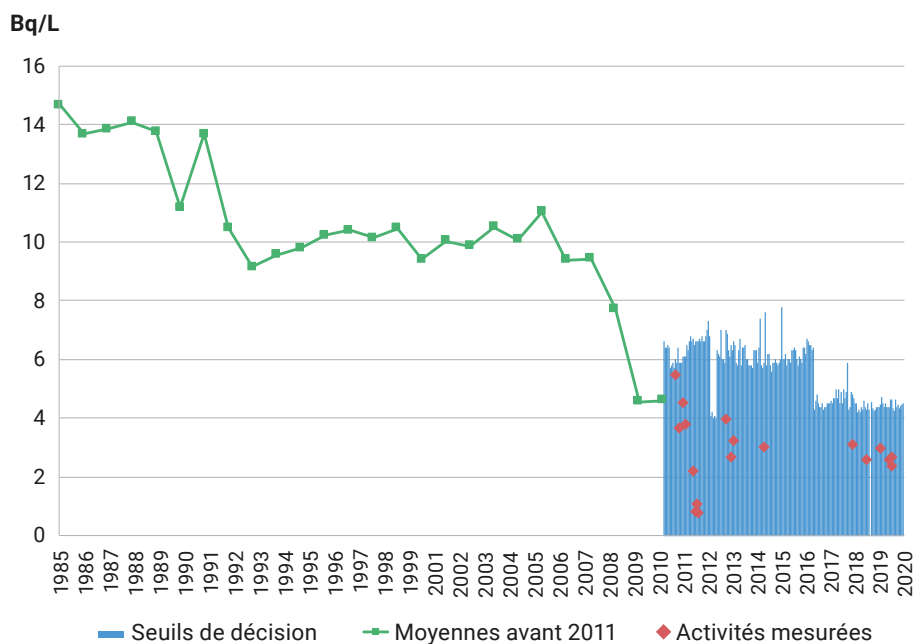


FIGURE 5 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ EN TRITIUM MESURÉE MENSUELLEMENT DANS LE RHÔNE EN AVAL DU SITE DE CREYS-MALVILLE



logique de l'environnement français de 2015 à 2017 (autour de 5 à 6 Bq/L). Ces valeurs restent néanmoins supérieures à la valeur du bruit de fond (de l'ordre de 1 Bq/L). Les mesures d'activités en tritium dans les eaux des nappes phréatiques sont toutes inférieures au seuil de décision (environ 4 Bq/L).

Les études radioécologiques réalisées en 2018 et 2019 dans l'environnement aquatique du site de Creys-Malville montrent un marquage des végétaux aquatiques en TOL par les rejets liquides tritiés du site (respectivement 7,3 Bq/L d'eau de combustion et 5 Bq/L d'eau de combustion) ainsi qu'en ¹³¹I par les rejets hospitaliers (le site de Creys-Malville ne rejetant pas ce radionucléide). L'activité mesurée du TOL dans les phanérogames immergées prélevées en amont du site en 2018 (104,2 Bq/L d'eau de combustion) est supérieure à la valeur attendue dans un environnement non soumis à des rejets industriels. L'origine de ce marquage n'a pu être identifiée. Les autres mesures réalisées dans l'environnement du site de Creys-Malville se situent au niveau d'un bruit de fond constitué par la radioactivité naturelle et la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl ou de celles des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Les résultats des mesures de TOL et de ¹⁴C des poissons sont illustrés au chapitre 3.1 CNPE en exploitation.

Un départ de feu s'est produit le 30 juin 2020 dans le bâtiment réacteur en démantèlement du site de Creys-Malville. Cet événement a été classé au niveau 0 de l'échelle INES. Les mesures réalisées par les réseaux de surveillance de la radioactivité complétées par celles menées par les équipes mobiles de l'IRSN ainsi que par les analyses des prélèvements de végétaux terrestres et des frottis surfaciques n'ont pas mis en évidence d'élévation du niveau de radioactivité dans l'environnement du site de Creys-Malville lié à l'incendie (https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Documents/IRSN_NI-mesures-Creys-Malville_20201007.pdf).

Les résultats de mesures radiologiques des échantillons environnementaux prélevés dans l'environnement du site de Creys-Malville montrent que l'influence des rejets de ce site n'est liée qu'au tritium. Cependant, dans les productions agricoles et les eaux de boisson, les activités en tritium sont du même ordre de grandeur que celles mesurées hors influence de toute installation. Les rejets du site en tritium n'étant pas mesurables dans les denrées, il n'est pas possible d'évaluer la dose par ingestion de denrées locales imputable au site. Par ailleurs, depuis mi-2017, les activités en 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.

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 gazeux. Après l'arrêt de l'installation, une production d'effluents gazeux de tritium a perduré, mais à des niveaux moindres. Pour les effluents liquides, le rejet dans l'Ellez a eu lieu jusqu'en 1992 ; postérieurement à cette date, les rejets ont cessé. Les effluents liquides, en moindre quantité et dépourvus de tritium, sont désormais expédiés à l'extérieur du site pour traitement. Conformément à la réglementation, le site des Monts d'Arrée dispose aujourd'hui d'une autorisation spécifique pour rejeter des substances radioactives, sous forme gazeuse uniquement, dans l'environnement. Les rejets radioactifs gazeux proviennent de la ventilation des bâtiments. Le tritium constitue la majeure partie des activités rejetées. Le tableau 1 présente les activités rejetées pour la période de 2012 à 2019. Les fluctuations dans les rejets sont liées aux opérations de démantèlement.

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° 2011-DC-0240 de l'ASN du 1^{er} septembre 2011 fixant les prescriptions relatives aux modalités de prélèvements d'eau et de rejets dans l'environnement des effluents liquides et gazeux de l'installation nucléaire de base n° 162 exploitée par Électricité de France (EDF-SA) sur la commune de Loqueffret (département du Finistère). Ces obligations sont précisées dans les décisions spécifiques propres au CNPE en déconstruction de Brennilis. La figure 1 et les tableaux 2A et 2B présentent le programme de surveillance de l'environnement du site de Brennilis réalisé par l'exploitant qui utilise des performances métrologiques cohérentes avec les objectifs 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, et d'autre part, d'observer l'influence des rejets sur l'environnement. Des études radioécologiques annuelles confiées par EDF à SUBATECH depuis 2018 viennent en complément des mesures réalisées par le site de Brennilis et utilisent des techniques métrologiques plus performantes afin de caractériser sur le long terme l'évolution des niveaux de radioactivité mesurés dans les compartiments terrestre et aquatique proches du site de Brennilis.

La surveillance effectuée par l'IRSN est identique à celle d'un CNPE à l'exception de l'absence d'hydro-collecteur.

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS REJETÉES PAR L'INSTALLATION DE BRENNILIS POUR LA PÉRIODE DE 2012 A 2019

Bilan des rejets atmosphériques (en GBq/an)			
Activités rejetées	Tritium	Autres produits de fission ou d'activation émetteurs bêta et gamma	Carbone-14
2012	39,9	0,00118	0,0694
2013	39,8	0,000025	0,2
2014	31,6	0,0000096	0,233
2015	27,7	0,0000976	0,251
2016	26,4	0,000109	0,049
2017	24,4	0,00013	0,043
2018	21,0	0,000092	0,044
2019	17,5	0,000106	0,097

FIGURE 1 / REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE DU PLAN TYPE DE LA SURVEILLANCE RÉALISÉE PAR EDF DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE BRENNILIS

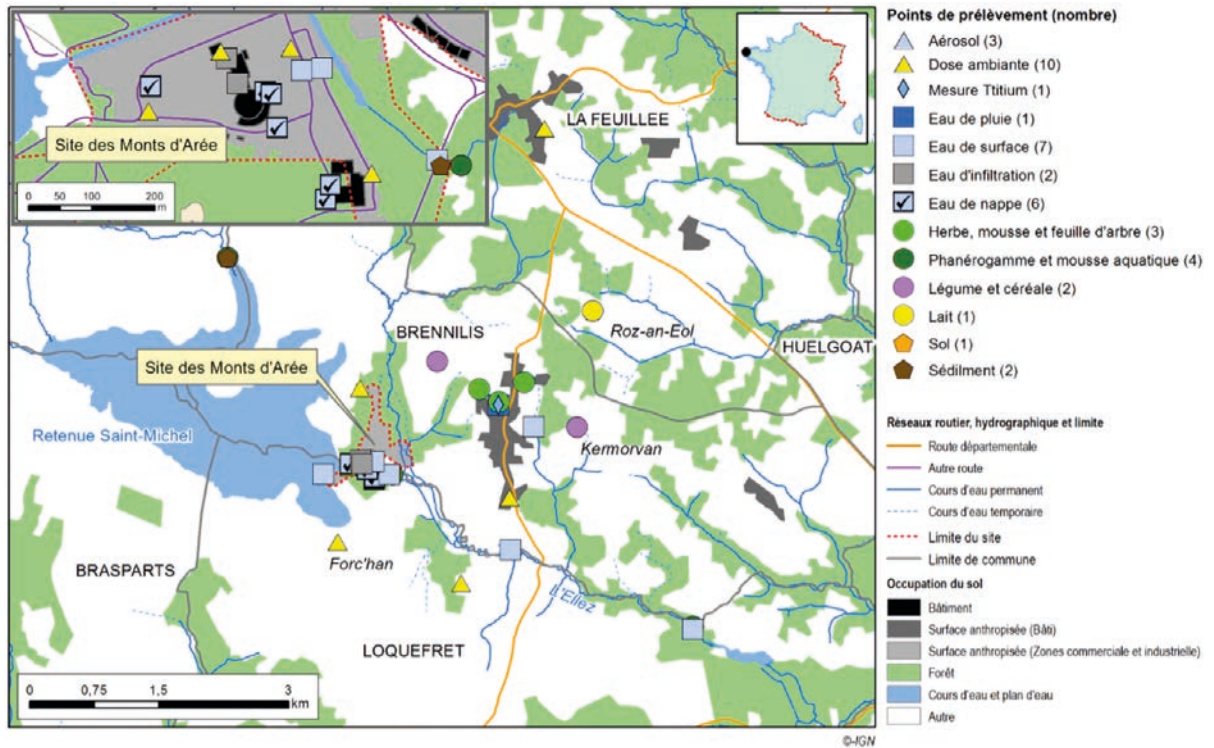


TABLEAU 2A / PLAN DE LA SURVEILLANCE RÉALISÉE PAR EDF DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE BRENNILIS

Milieu surveillé ou nature du contrôle	EDF
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 gamma 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 l'activité bêta 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 bi-mensuelle de l'activité bêta globale et du tritium
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> • 6 points de prélèvement (3 puits + 3 collecteurs de pompage) : spectrométrie γ et/ou mesures hebdomadaires à mensuelles de l'activité bêta globale, du K, et du ³H sur l'eau filtrée
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 + ¹⁴C, HTO et TOL annuel
Lait	<ul style="list-style-type: none"> • 1 échantillon trimestriel de lait (dont 1 sous les vents dominants) : spectrométrie γ + tritium + ⁹⁰Sr + ¹⁴C annuel
Productions agricoles	<ul style="list-style-type: none"> • 1 prélèvement annuel des principales productions agricoles : spectrométrie γ, ¹⁴C, HTO, TOL
Eaux de surface	<ul style="list-style-type: none"> • 2 prélèvements bi-mensuels (milieu récepteur aval) Forchan et Ellez aval : bêta globale, K et ³H sur l'eau filtrée + bêta globale sur MES • 1 prélèvement mensuel en amont du lac de Saint-Herbot : bêta globale, K et ³H sur l'eau filtrée + bêta globale sur MES • 1 prélèvement mensuel dans le lac de Saint-Michel : bêta globale, K et ³H sur l'eau filtrée + spectro gamma • 1 prélèvement mensuel en amont rejet SEO principal : bêta globale, K et ³H sur l'eau filtrée + bêta globale sur MES • 1 prélèvement mensuel au niveau du lieu de rejet des eaux pluviales : bêta globale 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 + ¹⁴C
Sédiments	<ul style="list-style-type: none"> • 2 échantillons annuels (amont/aval) : spectrométrie γ

TABLEAU 2B / PLAN DU SUIVI RADIOÉCOLOGIQUE ANNUEL AUTOUR DU SITE DE BRENNILIS DEPUIS 2018

Matrice	Spectrométrie γ	HTO	TOL	¹⁴ C	⁶³ Ni	⁵⁵ Fe	Spectrométrie α
Sol de prairie	1					1	
Herbe	1	1	1	1			
Lait	1	4	1	1			
Mousse terrestre	1						
Feuille de chênes		1	1	1			
Production agricole	2	2	2	2			
Sédiment	2		2	2	2		2
Mousse aquatique	2						
Phanérogames aquatiques	2		2	2			

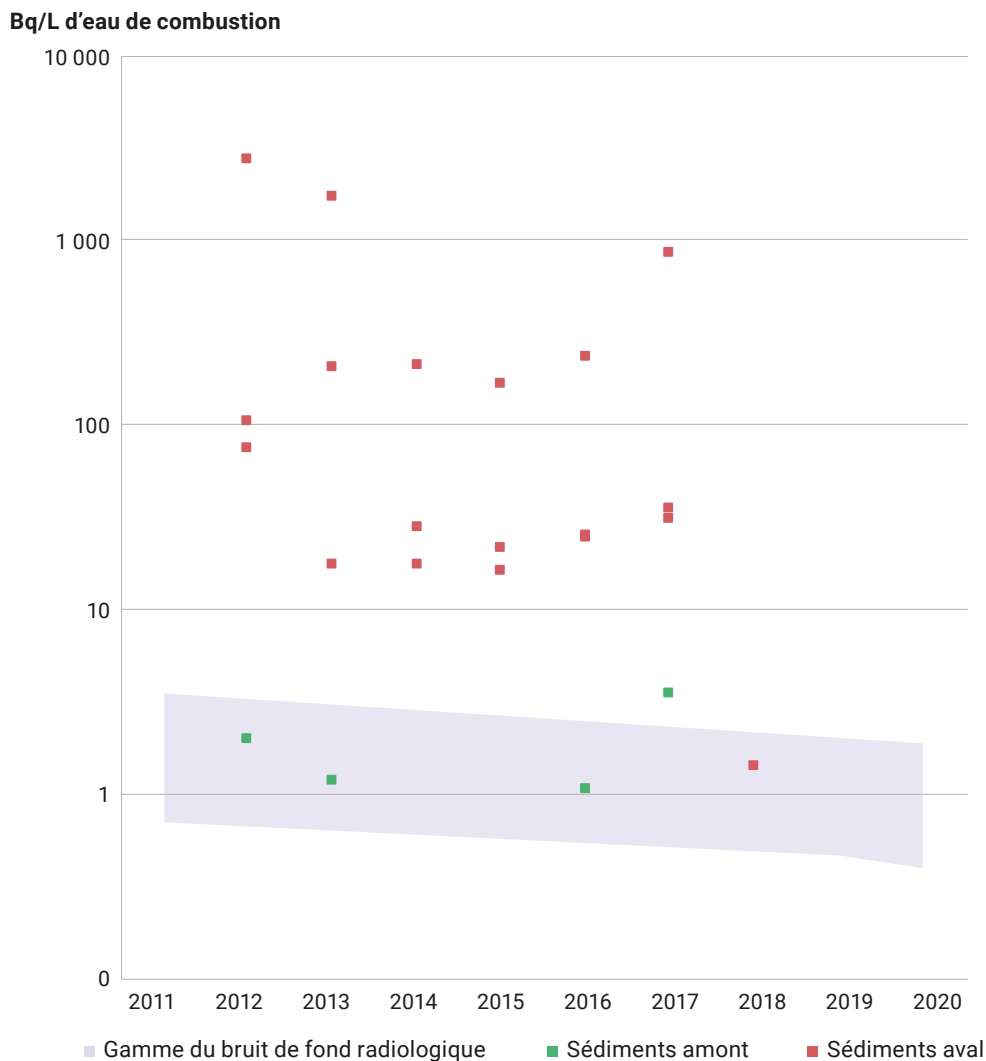
Influence de la centrale de Brennilis sur son environnement

L'absence de rejets liquides et des rejets gazeux très faibles expliquent que les résultats de mesure de la surveillance environnementale en tritium autour du site dans l'air, l'eau de pluie, la nappe phréatique, l'Ellez et le réservoir Saint-Michel sont tous inférieurs aux seuils de décision.

Afin de mieux caractériser l'influence potentielle sur l'environnement des opérations de déconstruction, EDF fait réaliser un suivi environnemental complémentaire du site depuis 2012. Les mesures par

spectrométrie gamma et alpha des différents échantillons mesurés dans les compartiments terrestre ou aquatique de l'environnement montrent des niveaux de radioactivité qui peuvent être plus élevés que la moyenne française mais qui relèvent soit de la radioactivité naturelle (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 particulière des sols ainsi que la pluviométrie élevée du site peuvent expliquer ces résultats de radioactivité naturelle et de radioactivité artificielle, respectivement.

FIGURE 2 / TENEURS EN TRITIUM ORGANIQUE DES SÉDIMENTS EN AMONT ET EN AVAL DU SITE DE BRENNILIS DE 2012 À 2018

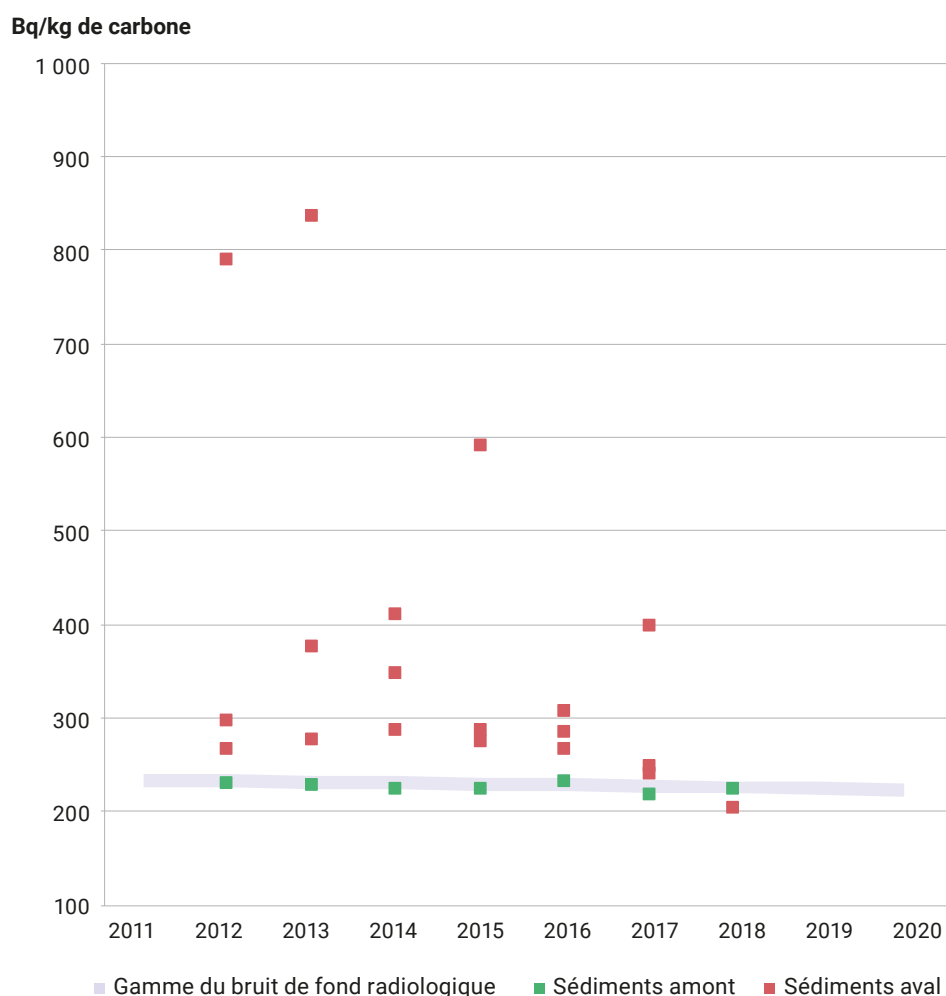


Dans le milieu terrestre, les niveaux d'activité en ^3H et ^{14}C correspondent aux niveaux ambiants mesurés en dehors de toute influence industrielle. Dans le milieu aquatique, il n'y a pas de différence significative entre les teneurs en ^{14}C des poissons pêchés en amont et en aval. De même, depuis 2012, il n'est plus possible d'observer un marquage en ^{14}C dans les végétaux aquatiques.

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 ^{14}C

et en TOL dans les sédiments (figures 2 et 3), illustrant la rémanence des rejets anciens du site. Ces marquages sont en diminution car le site ne rejette plus d'effluents liquides depuis 1992. En 2018, les activités en TOL et en ^{14}C mesurées dans les sédiments prélevés en aval proche du site, plus faibles que les années passées, sont inférieures aux niveaux mesurés dans les sédiments prélevés en amont du site. Ces faibles niveaux mesurés dans les sédiments pourraient s'expliquer par le changement de localisation du prélèvement en 2018.

FIGURE 3 / TENEURS EN ^{14}C DES SÉDIMENTS EN AMONT ET EN AVAL DU SITE DE BRENNILIS DE 2012 À 2018



3.3. 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 1 404 tonnes (2019). 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. Les rejets liquides constitués uniquement d'eaux pluviales et industrielles sont effectués dans le canal de Tauran qui longe le site de Malvési. Le canal de Tauran aboutit dans le canal de la Robine qui traverse la ville de Narbonne avant de se jeter dans l'étang de Bages-Sigean. La masse d'uranium rejetée en 2019 est de 4,8 kg, équivalant à 0,12 GBq d'uranium naturel. Depuis la période d'observation précédente (2015-2017), les rejets d'uranium dans l'atmosphère ont diminué d'un ordre de grandeur environ (figure 2). Ainsi, la quantité d'uranium rejetée dans l'atmosphère par les différents ateliers de l'usine a été de 1,3 kg pour l'année 2019, correspondant à 0,03 GBq d'uranium naturel. La diminution observée en 2018-2019 est en grande partie liée à la baisse de la production de l'usine.

FIGURE 1 / LOCALISATION DU SITE ORANO DE MALVÉSI DANS L'AUDE

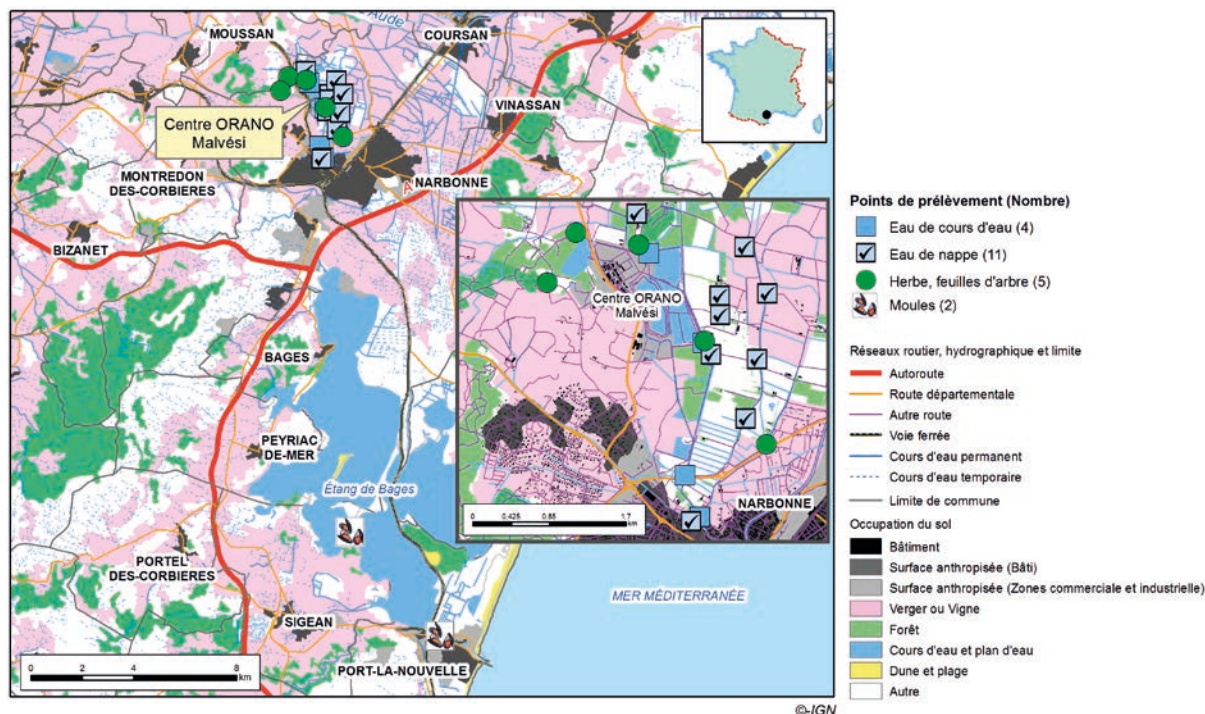
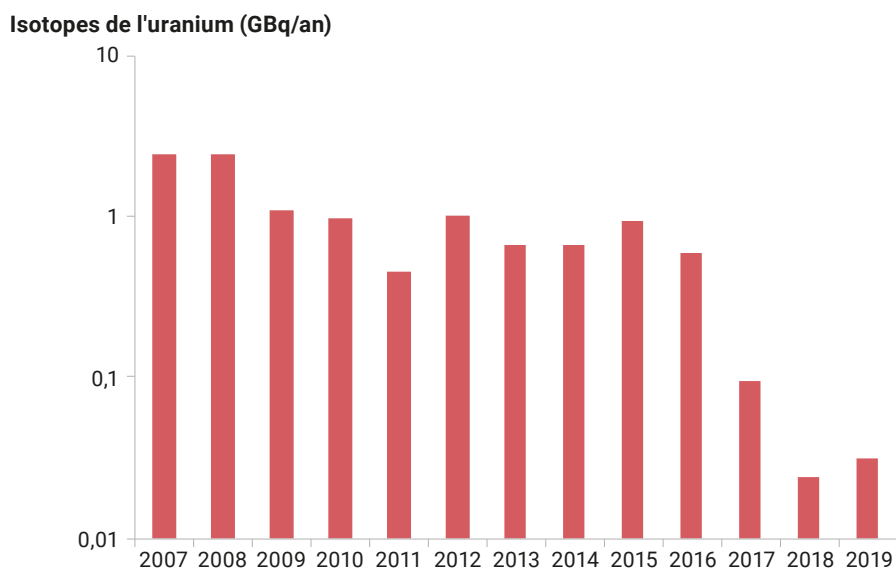


FIGURE 2 / CHRONIQUE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES D'URANIUM DU SITE DE MALVÉSI (GBq/an)



À ces rejets d'uranium, liés au fonctionnement de l'usine, s'ajoutent les radionucléides provenant de l'INB ÉCRIN. Il s'agit, depuis les travaux de couverture des bassins B1/B2 débutés en 2007, essentiellement des eaux pluviales collectées au niveau de l'INB puis envoyées dans les bassins d'évaporation ou rejetées dans le canal de Tauran, après traitement.

L'usine de conversion de l'uranium de Malvési est soumise à la réglementation des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et aux prescriptions de son arrêté préfectoral en matière de surveillance de l'environnement. La surveillance de l'INB ÉCRIN, encadrée réglementairement par des décisions de l'ASN, s'inscrit également dans le plan de surveillance de l'usine. 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 en milieu 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). L'IRSN réalise également des prélèvements dans le milieu 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 Malvési, 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).

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 d'une part, et des eaux de surface et des espèces aquatiques, d'autre part.

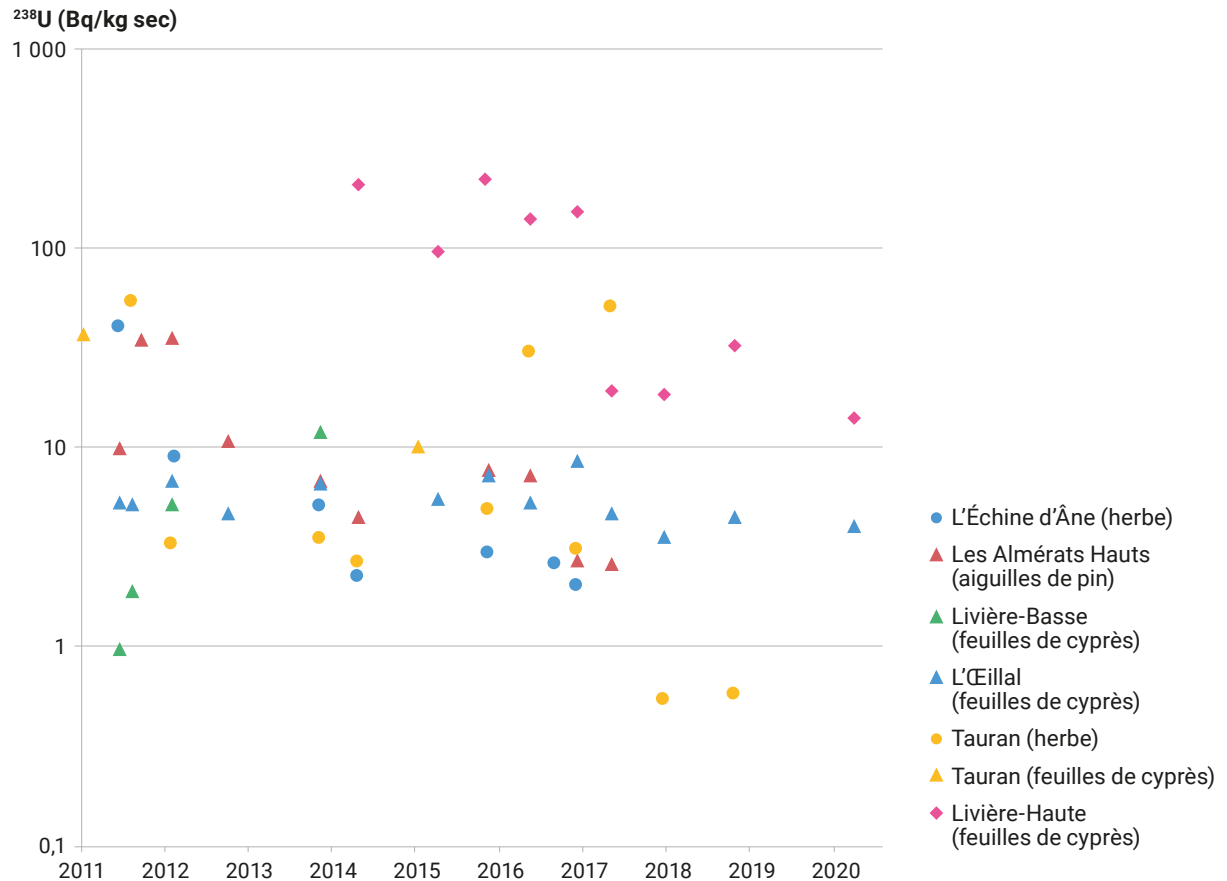
Le plan de surveillance radiologique de l'environnement du site de Malvési ne comporte pas d'analyses d'uranium dans les poussières atmosphériques mais seulement des mesures mensuelles, fixées par arrêté préfectoral, d'activités alpha et bêta globales, à partir de plusieurs points de prélèvements, ainsi que des analyses semestrielle de thorium-230, d'américium-241 et de plutonium notamment. Les données exploitées dans le *Bilan radiologique 2011-2014* provenaient d'une étude réalisée par l'IRSN entre novembre 2009 et novembre 2010. Cette étude était basée sur l'utilisation d'une station de prélèvements

d'air à grands débits (335 m³/h) et des analyses hebdomadaires des filtres par spectrométrie de masse (ICP-MS). En 2020-2021, l'IRSN a débuté une nouvelle campagne du même type. Les premiers résultats disponibles (6 semaines de prélèvements) donnent une activité moyenne en ²³⁸U dans l'air de 14 µBq/m³ d'air. Cette moyenne est plus faible que celle mesurée en 2009-2010 en liaison avec la baisse des rejets atmosphériques d'uranium par le site (figure 2). Cette valeur reste néanmoins très supérieure à l'activité volumique mesurée en dehors de l'influence des rejets d'une installation nucléaire (de l'ordre de 0,2 µBq/m³ d'air).

Des prélèvements de feuilles de cyprès sont réalisés au nord (lieu-dit « l'Éillal », situé à proximité de l'usine) depuis 2011, et également à l'est du site (Livière-Haute), sous le vent dominant provenant du site Orano

depuis 2014. En complément, de l'herbe de prairie a également été prélevée à l'est du site (Tauran). Les activités en uranium-238 les plus élevées (20-30 Bq/kg sec) sont observées à l'est du site, à Livière-Haute, sous le vent dominant provenant du site Orano (figure 3). En comparaison, les activités mesurées sur les autres points de prélèvement sont plus faibles (< 10 Bq/kg sec à l'Éillal et à Tauran). Ainsi, les activités mesurées dans les végétaux terrestres témoignent de l'influence plus ou moins marquée d'un point de prélèvement à l'autre, des rejets en uranium provenant du site Orano de Malvési, en comparaison des mesures dans les végétaux prélevés en dehors de l'influence des rejets d'une installation nucléaire (entre 0,1 et 1 Bq/kg sec). Toutefois, le marquage en uranium-238 des végétaux prélevés à Livière-Haute et à Tauran durant la période 2017-2020 est très inférieur à celui qui a été observé durant les périodes précédentes (2014-2017 et

FIGURE 3 / ACTIVITÉS MASSIQUES EN URANIUM-238 DES VÉGÉTAUX PRÉLEVÉS DANS L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE DU SITE ORANO DE MALVÉSI ENTRE 2011 ET 2020 (en Bq/kg sec)

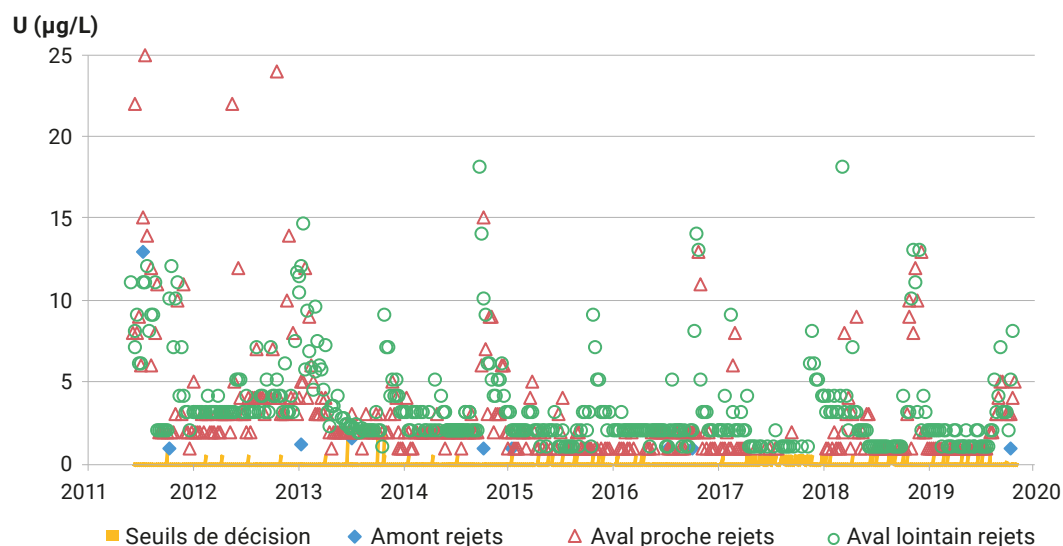


2011-2014). Cette diminution du marquage des végétaux est probablement la conséquence de la baisse des rejets dans l'atmosphère, explicitée dans le paragraphe précédent.

Dans les eaux de surface prélevées à l'amont des rejets (canal de Tauran), la concentration volumique en uranium est, dans 63 % 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 2,1 µg/L pour la période 2018-2020, ce qui correspond à une activité volumique moyenne en 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 milieu aquatique (figure 4).

FIGURE 4 / TENEUR EN URANIUM DANS L'EAU DU CANAL DE TAURAN, EN AMONT ET EN AVA DES REJETS DU SITE DE MALVÉSI, ENTRE 2011 ET 2019 (en µg/L)

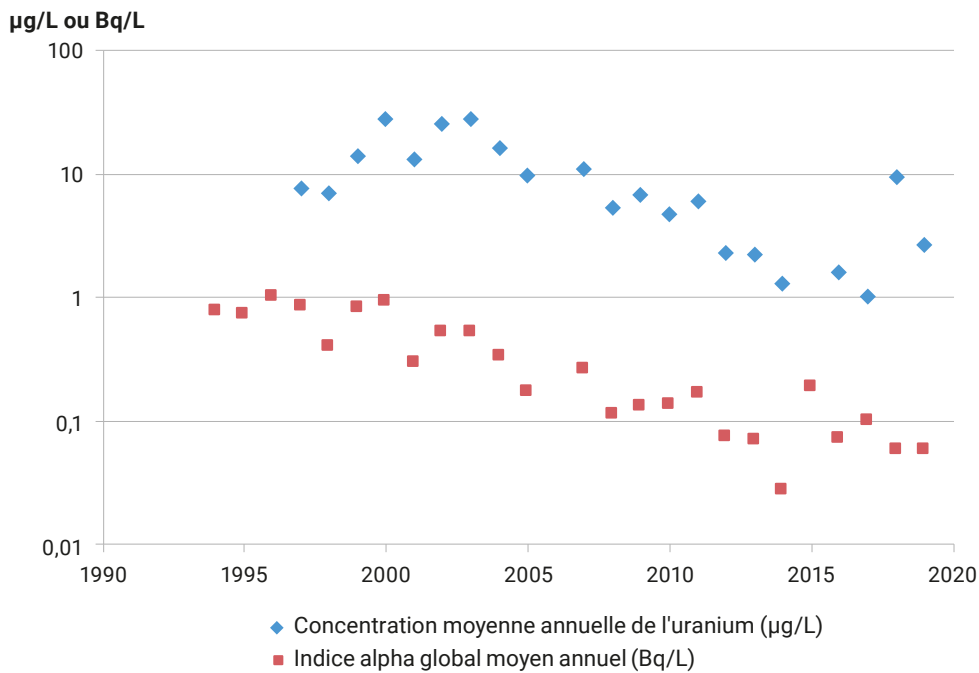


Vue aérienne du site de Malvési

La concentration moyenne observée entre 2018 et 2020 est relativement proche de celle de la précédente période d'observation (1,7 µg/L entre 2011 et 2017). Stable depuis 2012 (1 à 2 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 5). Cette concentration volumique moyenne dans l'eau prélevée à l'aval des rejets est inférieure à la valeur guide proposée par l'OMS pour l'eau de boisson (30 µg/L).

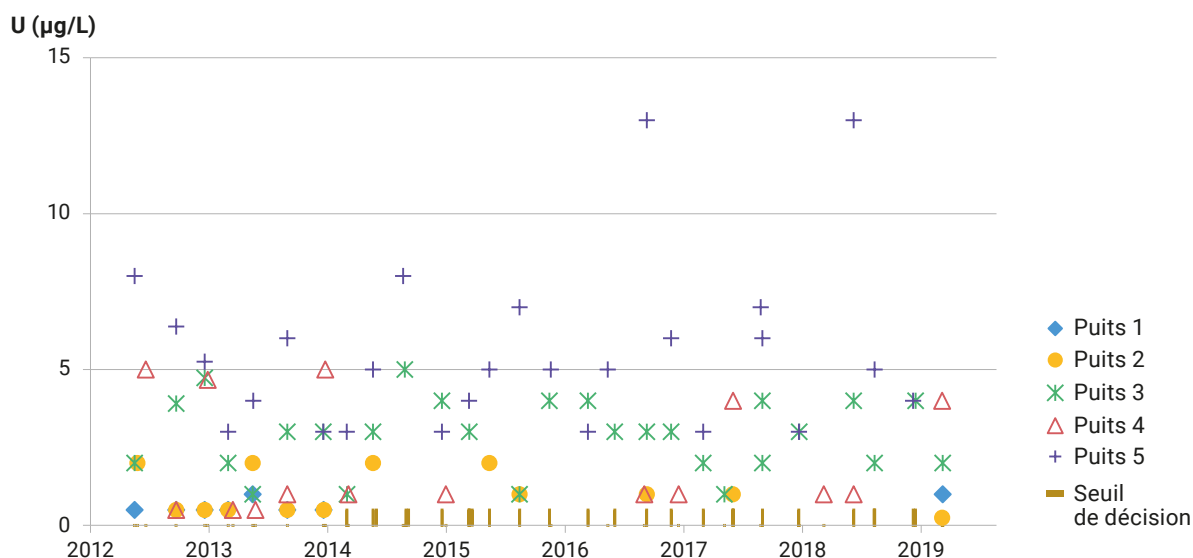
Le suivi de l'eau de la nappe phréatique, prélevée chez des riverains du site, montre que la concentration volumique en uranium varie d'un point de prélèvement à un autre (figure 6). Cependant, la concentration en uranium pour un puits donné varie peu au cours du temps. La concentration moyenne en uranium est de 2,6 µg/L, équivalente à une activité moyenne de ²³⁸U de 0,032 Bq/L, sans que l'origine de l'uranium soit connue avec certitude (naturelle ou liée au site).

FIGURE 5 / CHRONIQUE DES CONCENTRATIONS VOLUMIQUES MOYENNES ANNUELLES EN URANIUM (µg/L) ET DES INDICES ALPHA GLOBAUX ANNUELS (Bq/L) DANS LES EAUX DU CANAL DE TAURAN, ENTRE 1994 ET 2019



L'une des deux stations de prélèvement d'aérosols atmosphériques à grand débit, installée par l'IRSN sous les vents du site de Malvés pour la campagne de mesures débutée fin 2020. En fond d'image, les bassins d'évaporation et l'usine.

FIGURE 6 / CONCENTRATION VOLUMIQUE EN URANIUM DANS L'EAU PRÉLEVÉE DANS CINQ PUIITS DE RIVERAINS DE L'USINE ORANO DE MALVÉSI (en µg/L)



Les activités massiques moyennes des isotopes de l'uranium (^{234}U et ^{238}U) des moules issues de l'étang de Bages-Sigean (0,20 et 0,18 Bq/kg de matière fraîche, respectivement) sont 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 : 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). Cependant, un des échantillons de moules prélevé à Sigean en 2018 présente des traces d' ^{236}U , isotope de l'uranium d'origine artificielle. 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) et la présence d' ^{236}U doit être confirmée par davantage de mesures dans l'étang.

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 influencée par les rejets atmosphériques, située à l'est de l'usine, conduirait à une dose efficace par inhalation de poussières d'uranium de 0,8 µSv/an. Cette valeur est plus faible que celle estimée dans les bilans radiologiques précédents (2 µSv/an), en raison principalement de

la baisse des rejets atmosphériques d'uranium du site. L'eau du canal de Tauran n'est pas consommée régulièrement par les riverains. Toutefois, si cela se produisait (remplissage d'une gourde, par exemple), la consommation de 1 L conduirait à une dose due à l'uranium extrêmement faible de 0,003 µSv/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 du débit de dose ambiant. Parmi les points de mesures du débit de dose accessibles au public disposés autour du site de Malvési, ce sont les deux points situés à la clôture nord-est d'une part et à la source de l'Œillal d'autre part, qui enregistrent les moyennes les plus élevées sur la période 2018-2020. Après déduction du bruit de fond local, les débits de doses résultant de la proximité du site qui y sont mesurés sont de 354 nSv/h et 308 nSv/h respectivement (dans le cas du dosimètre de l'Œillal, la moyenne correspond aux 6 mois écoulés depuis son implantation au début de 2021). Il est difficile d'imaginer une présence prolongée au niveau de ces points de mesures. La présence d'une personne durant une dizaine d'heures à proximité immédiate du point où se trouve le dosimètre de la clôture nord-est conduirait à une dose externe ajoutée de 3,5 µSv/an. Des temps de présence plus importants conduiraient bien sûr à des doses plus élevées⁽¹⁾.

(1) À ce titre, il convient de noter qu'un scénario extrêmement pénalisant, supposant la présence dans le voisinage immédiat d'un agriculteur à raison de 2 000 h/an, conduirait à une dose de l'ordre de 0,7 mSv/an. Cette estimation peu réaliste mais qui reste envisageable faute d'éléments de scénarios d'exposition complémentaires, reste cependant inférieure à la dose limite d'exposition de la population liée à une installation nucléaire qui est de 1 mSv/an.

Le site Orano du Tricastin

Situé dans la vallée du Rhône, entre Bollène et Pierrelatte, à proximité immédiate du CNPE d'EDF, le site Orano du Tricastin regroupe plusieurs installations chargées de la conversion et de l'enrichissement de l'uranium (figure 1). Orano intervient également dans la chimie de l'uranium (défluoration et dénitrification 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 (SET) dans les usines Georges-Besse II, alors que l'usine d'enrichissement par diffusion gazeuse Eurodif est arrêtée depuis juin 2012. Enfin, Socatri est chargé du traitement des effluents uranifères ainsi que du traitement, de l'entreposage et de l'élimination de déchets radioactifs et conventionnels.

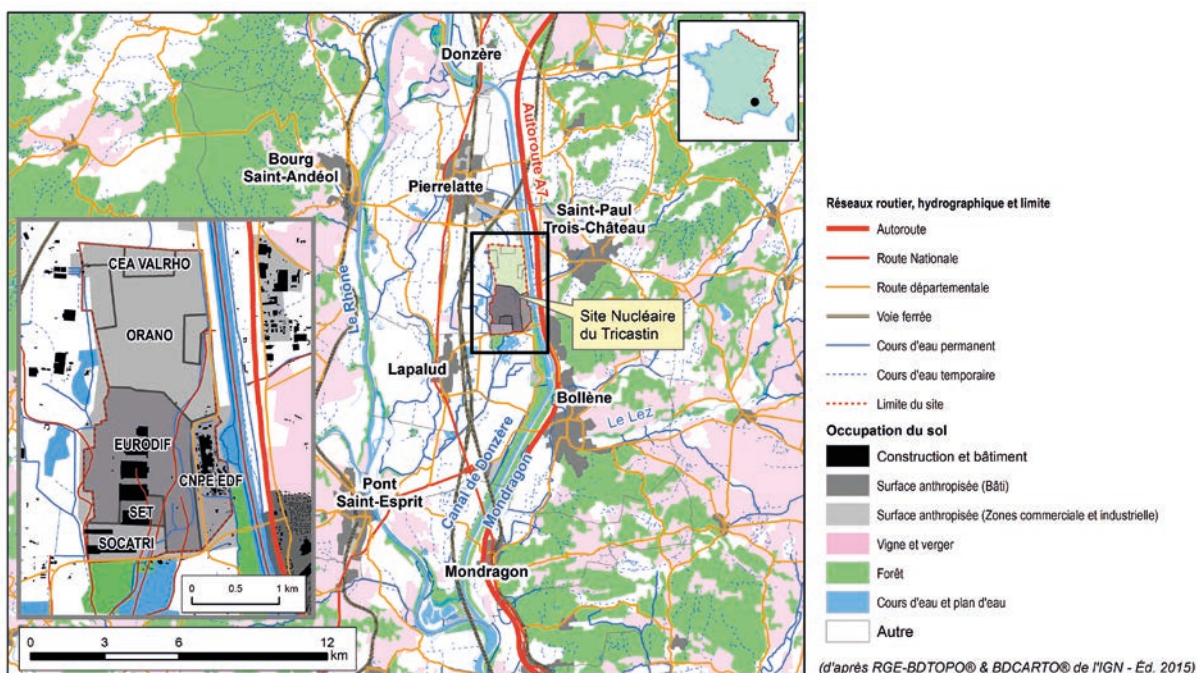
En 2017, le site Orano du Tricastin compte huit installations nucléaires de base (INB) et une INBS (installation nucléaire de base secrète). Il comprend également deux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) classées Seveso.

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 rejetés par les installations du site Orano du Tricastin (figures 2 et 3). Le carbone-14 et le tritium sont prépondérants dans les rejets atmosphériques, en quantité comparable (0,65 et 0,60 GBq/an, respectivement en 2019). Les activités en uranium rejetées dans l'air, tout isotope confondu, diminuent (0,006 GBq/an, en 2019) et proviennent principalement de l'usine de conversion. Les transuraniens (isotopes du plutonium notamment) et les produits de fission représentent 0,0003 et 0,005 GBq/an, respectivement, en 2019. 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 constitue la principale zone influencée par les rejets atmosphériques provenant du site Orano du Tricastin.

Après traitement et contrôle du niveau d'activité, les effluents liquides issus des procédés sont dirigés vers le canal de Donzère-Mondragon, à l'est du site. Depuis 2010, les rejets en milieu aquatique varient peu au cours du temps. En 2019, les rejets liquides

FIGURE 1 / LOCALISATION DU SITE ORANO DU TRICASTIN



radioactifs du site se composent essentiellement d'isotopes de l'uranium, dont 2,1 GBq/an environ sont rejetés 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 (0,31 GBq/an), le tritium (0,22 GBq/an), d'autres produits de fission (0,22 GBq/an) et des transuraniens (0,058 GBq/an).

FIGURE 2 / CHRONIQUE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES DU SITE ORANO DU TRICASTIN PENDANT LA PÉRIODE 2009-2020

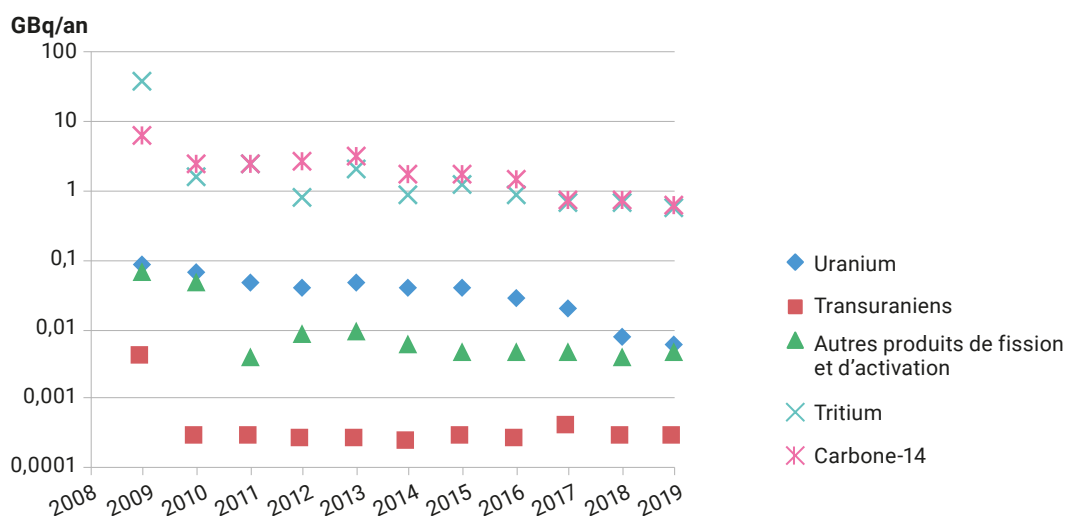
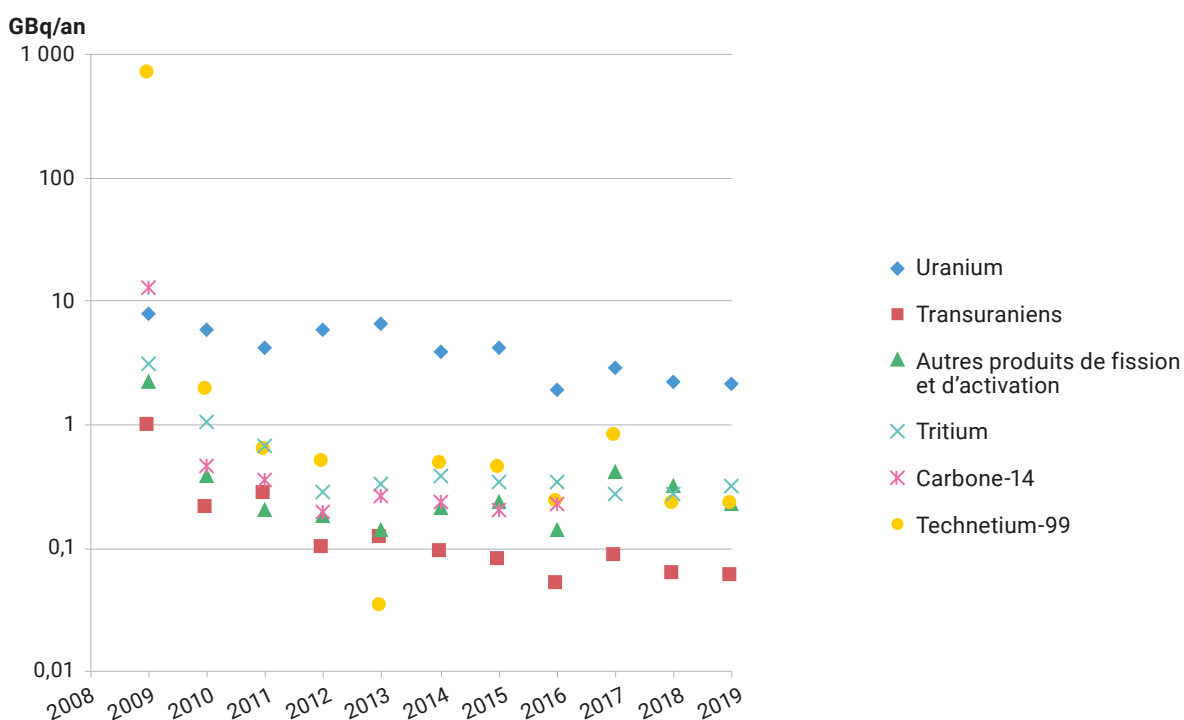


FIGURE 3 / CHRONIQUE DES REJETS AQUATIQUES DU SITE ORANO DU TRICASTIN PENDANT LA PÉRIODE 2009-2020



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 en milieu 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 aval des rejets pour la mesure de la concentration volumique en uranium et en 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 prélever l'eau de la nappe phréatique et détecter une éventuelle influence à l'aval hydraulique du site. La surveillance du milieu terrestre s'appuie sur un réseau de points de prélèvement situés sous l'influence potentielle des rejets atmosphériques provenant du site. À ces points, sont prélevées de l'herbe et des denrées agricoles principalement pour la mesure de l'uranium et des transuraniens.

Dans les principaux cours d'eau cités précédemment, l'IRSN réalise également des prélèvements pour détecter une éventuelle influence du site du Tricastin sur les teneurs en uranium de l'eau, des végétaux aquatiques et des sédiments. En complément, les transuraniens sont mesurés dans les sédiments. En milieu terrestre, la surveillance exercée par l'IRSN repose sur des prélèvements de denrées en différents points, pour la mesure du tritium et du carbone-14.

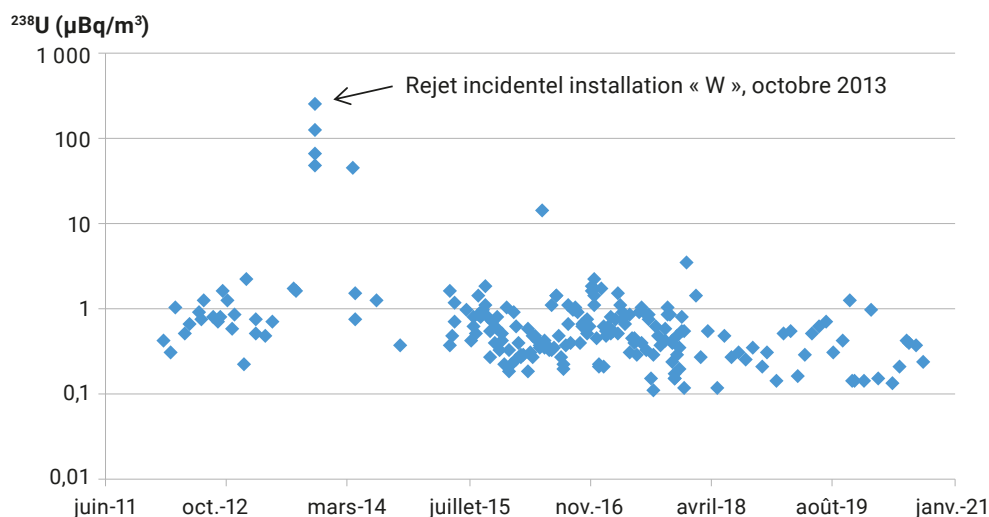
De plus, depuis 2014, des prélèvements d'aérosols et des mesures des isotopes de l'uranium sont réalisés par l'IRSN au sud-est du site, dans la continuité de l'étude réalisée dans le compartiment atmosphérique en 2012 (cf. figure 7 p. 115).

L'influence du site Orano du Tricastin et l'exposition du public

Les isotopes de l'uranium

Les mesures effectuées sur les aérosols prélevés par l'IRSN entre fin 2017 et septembre 2020 permettent d'estimer une activité moyenne en uranium-238 de $0,5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air, environ deux fois plus faible que la valeur moyenne observée entre 2014 et 2017 ($1,1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air). Cette activité volumique, plus élevée que le niveau d'activité de l'uranium mesuré 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 en uranium des installations d'Orano du Tricastin dans le compartiment atmosphérique. Dans la période d'observation (2018-2020), seules deux mesures de l'activité volumique en uranium-238 dépassent notablement la valeur moyenne de $0,5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air : celles des filtres de janvier et de février 2018 ($3,7$ et $1,5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air, respectivement) (figure 4). En comparaison, rappelons que le rejet incidentel d'uranium appauvri de l'installation « W »

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



en octobre 2013, avait induit une activité en ^{238}U dans l'air supérieure à $100 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'air.

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 $0,03 \mu\text{Sv}/\text{an}$; une estimation deux fois plus faible que celle effectuée pour la période précédente (2015-2017), qui était de $0,06 \mu\text{Sv}/\text{an}$.

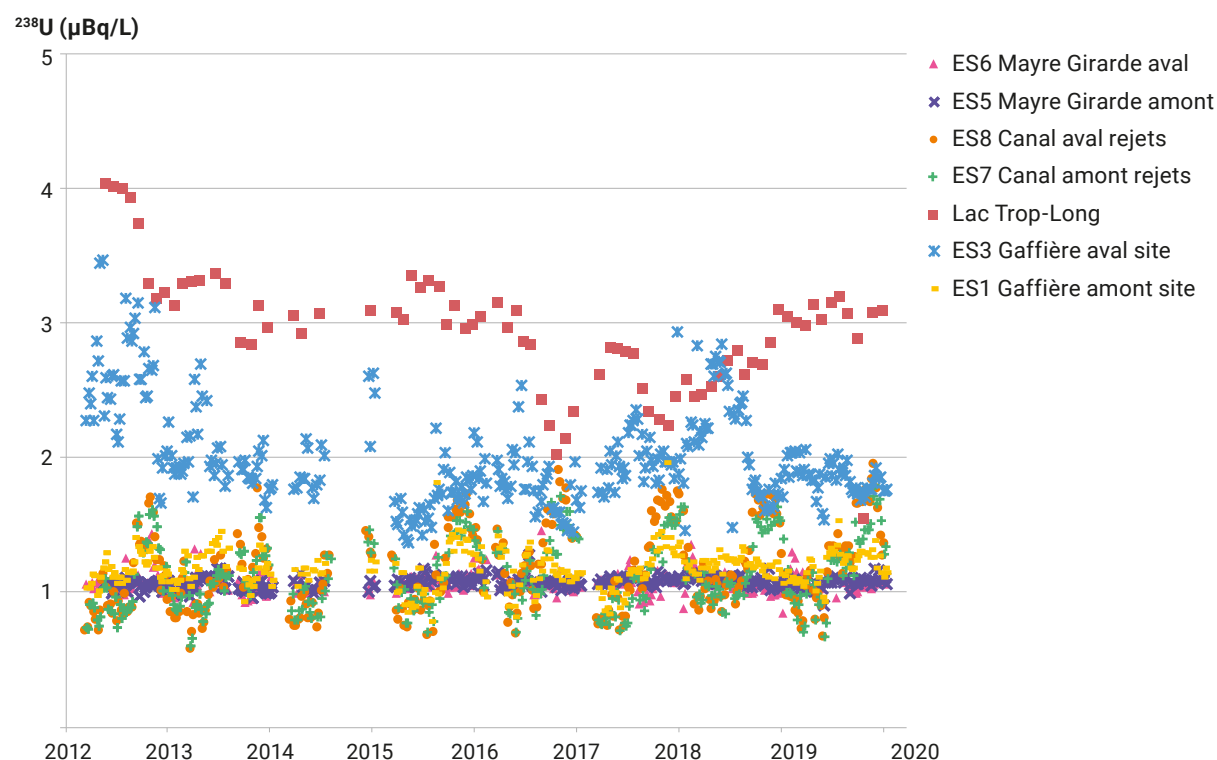
Dans l'herbe prélevée par Orano dans le cadre de la surveillance réglementaire, les activités massiques en uranium-238 mesurées sont peu variables et comprises entre $0,29$ et $0,65 \text{ Bq}/\text{kg sec}$ en moyenne, selon le site de prélèvement (tableau 1). En comparaison de la période 2015-2017, l'activité massique en uranium-238 dans cette matrice reste stable.

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

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES EN URANIUM-238 DANS L'HERBE PRÉLEVÉE DANS LE RÉSEAU DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT (Bq/kg sec)

	Uranium-238 (Bq/kg sec)		
	2011-2014	2015-2017	2018-2020
ID1 - Favayrolles	0,14	0,35	0,32
ID2 - Prés Guérinés	0,20	0,50	0,44
ID3 - Bollène-la-Croisière	0,24	0,52	0,65
ID4 - Lapalud	0,11	0,32	0,29

FIGURE 5 / CONCENTRATION VOLUMIQUE EN URANIUM DANS LES EAUX DE SURFACE PRÉLEVÉES DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE ORANO DU TRICASTIN DEPUIS 2012 (en $\mu\text{g}/\text{L}$)



Parmi les eaux 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 (2,7 µg/L en moyenne sur la période 2018-2020, 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 2015-2017.

Une activité moyenne de l'uranium-238 un peu plus élevée est observée dans les sédiments de la Gaffière à l'aval du site Orano (activité moyenne en uranium-238 de 35 Bq/kg dans les sédiments), en comparaison de celle de l'amont (activité moyenne en uranium-238 de 31 Bq/kg dans les sédiments) (tableau 2). En comparaison des sédiments, l'activité en uranium-238 des végétaux aquatiques est plus homogène et aucun marquage par cet élément de cette matrice n'est observé à l'aval du site (tableau 3). 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 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 dose due à l'uranium insignifiante de 0,003 µSv.

Les prélèvements et les mesures de l'eau du canal de Donzère-Mondragon ne font pas apparaître de différence significative entre la concentration volumique en uranium, mesurée à l'amont du rejet et celle mesurée en aval (en moyenne 1,16 et 1,25 µg/L, respectivement) (figure 5). De même, peu de variations sont observées entre les périodes d'observation 2015-2017 et 2018-2020. 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).

TABLEAU 2 / ACTIVITÉS MASSIQUES DES ISOTOPES DE L'URANIUM ET EN TRANSURANIENS DANS LES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS DANS L'ENVIRONNEMENT AQUATIQUE DU SITE ORANO DU TRICASTIN ENTRE 2018 ET 2020 (Bq/kg sec)

	Uranium-234 (Bq/kg sec)	Uranium-235 (Bq/kg sec)	Uranium-238 (Bq/kg sec)	Plutonium-239+240 (Bq/kg sec)	Américium-241 (Bq/kg sec)
Canal de Donzère-Mondragon, amont rejets	34	1,6	34	0,11	0,14
Canal de Donzère-Mondragon, aval rejets	30	1,4	30	0,08	0,05
Gaffière, amont rejets	31	1,4	31	-	-
Gaffière, aval rejets	31	1,6	35	< 0,08	nm
Lauzon	17	0,8	17	-	

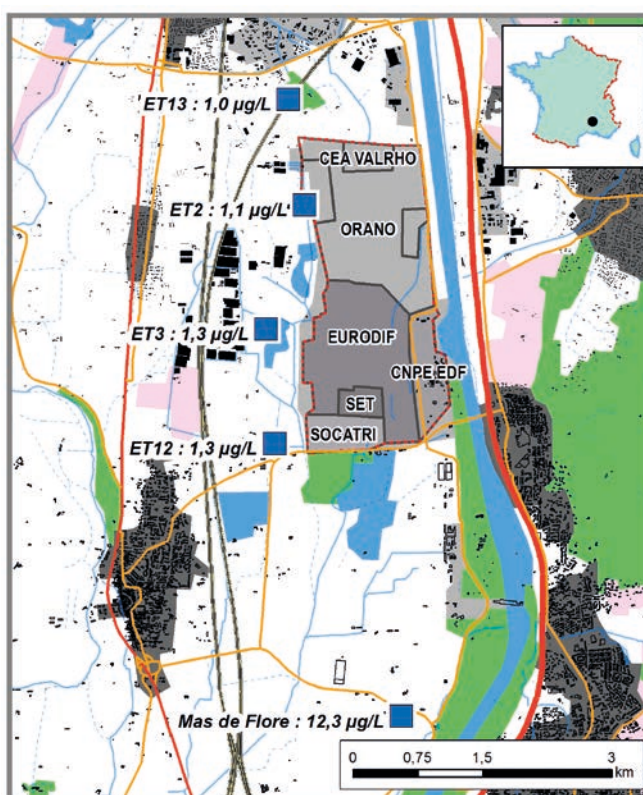
TABLEAU 3 / ACTIVITÉS MASSIQUES DES ISOTOPES DE L'URANIUM DANS LES VÉGÉTAUX AQUATIQUES PRÉLEVÉS DANS L'ENVIRONNEMENT AQUATIQUE DU SITE ORANO DU TRICASTIN ENTRE 2018 ET 2020 (Bq/kg sec)

	Uranium-234 (Bq/kg sec)	Uranium-235 (Bq/kg sec)	Uranium-238 (Bq/kg sec)
Canal de Donzère - amont CNPE	9,8	0,5	9,4
Canal de Donzère - aval CNPE	12	0,6	12
Gaffière - amont CNPE	15	0,8	15
Gaffière - aval CNPE	12	0,6	12
Lauzon	13	0,6	15

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).

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).

FIGURE 6 / CARTOGRAPHIE DE LA CONCENTRATION VOLUMIQUE MOYENNE EN URANIUM DANS LES EAUX DE LA NAPPE PRÉLEVÉES DANS LES DIFFÉRENTS PIÉZOMÈTRES DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE ORANO DU TRICASTIN ENTRE 2018 ET 2020 (en µg/L)



Concentration volumique moyenne en uranium dans l'eau de nappe
■ Eau de nappe (5 points de prélèvements)

©-JGV

Le tritium et le carbone-14

L'activité en carbone-14 dans les poissons prélevés dans le Rhône, à Mornas, en 2018 et 2019 (71 et 97 Bq/kg frais, respectivement) est supérieure au bruit de fond dans le milieu aquatique, de l'ordre de 20 à 25 Bq/kg frais, observable à l'amont des CNPE. Rappelons que les poissons et mollusques du Rhône, influencés par les rejets en carbone-14 des CNPE implantées le long du fleuve, témoignent d'une activité croissante de ce radionucléide vers l'aval, avec des valeurs maximales de l'ordre de 110 à 168 Bq/kg frais pour la période 2018-2020 (cf. chapitre 3.1). 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 (0,2 Bq/an en 2019) sont plus de 100 fois plus faibles que ceux du CNPE du Tricastin (40,6 GBq/an).

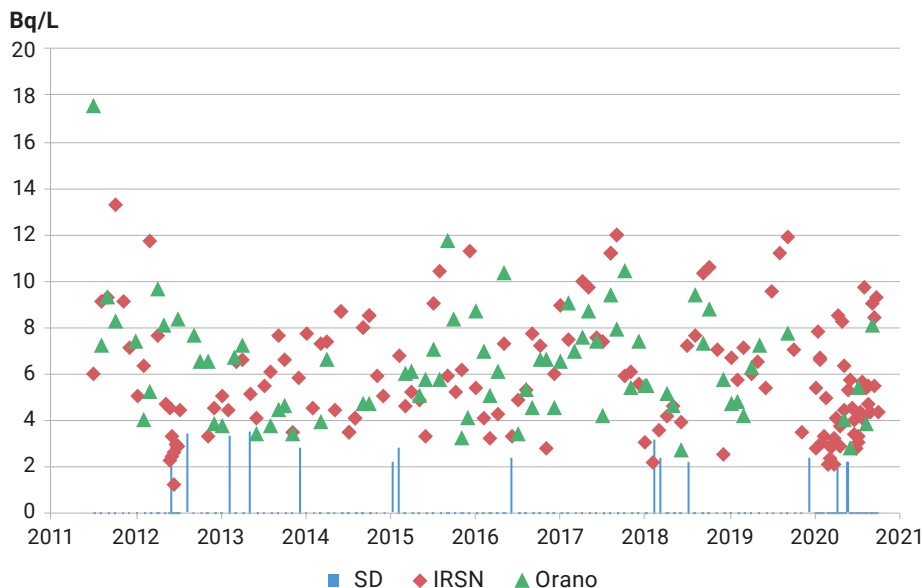
En milieu terrestre, le marquage des végétaux par le carbone-14, extrêmement discret et limité à l'environnement proche du site, n'est décelable qu'au travers d'un indicateur très sensible : l'activité spécifique. Elle est en moyenne de 278 Bq/kg C, en 2018-2020, dans l'herbe prélevée sous l'influence des rejets, soit supérieure à la valeur observée en France en dehors de l'influence des rejets d'une installation nucléaire, de l'ordre de 225 Bq/kg 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 0,65 GBq/an en 2019, sont plus

de 800 fois inférieurs à ceux du CNPE d'EDF voisin (560 GBq/an en 2019).

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 du tritium dans les eaux du canal de Donzère-Mondragon, effectuées par Orano et l'IRSN entre 2018 et 2020, donnent des valeurs moyennes très proches l'une de l'autre : 4,7 et 5,2 Bq/L, respectivement (figure 7). Ces activités volumiques, légèrement plus faibles que celles mesurées entre 2015 et 2017 par Orano et l'IRSN (6,3 et 6,7 Bq/L, respectivement), sont principalement dues aux rejets d'EDF (cf. chapitre 3.1). En effet, les rejets de tritium d'Orano (0,3 GBq/an en 2019) sont infimes au regard des rejets du seul CNPE d'EDF voisin (37 400 GBq en 2019). De plus, les CNPE situées en amont constituent d'autres sources de ce radionucléide très mobile mesuré dans l'eau.

L'activité du tritium dans les denrées terrestres est faible (entre 3,3 et 4,1 Bq/L dans le lait de chèvre provenant de Mondragon et entre 2,4 et 3,8 Bq/L d'eau de combustion dans les salades de Bollène - La Croisière), bien que supérieure à la valeur de référence du bruit de fond du tritium (hors de l'influence des rejets des installations nucléaires), qui est de 1 Bq/L, dans une gamme allant de 0,4 à 2 Bq/L sur la période 2018-2020. 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.

FIGURE 7 / ACTIVITÉ VOLUMIQUE EN TRITIUM DANS L'EAU DU CANAL DE DONZÈRE-MONDRAGON, À L'AVAL DES REJETS DU SITE ORANO DU TRICASTIN, ENTRE 2011 ET 2020



Conclusion

L'influence 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 d'inhalation de l'ordre de $0,03 \mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette dose est très proche de celle calculée par modélisation par Orano sur la base des activités rejetées en 2019 ($0,05 \mu\text{Sv}/\text{an}$). Ces estimations calculatoires montrent que cette dose liée à l'inhalation représenterait près de 62 % de la dose totale susceptible de résulter des rejets des installations d'Orano. En raison des rejets du CNPE d'EDF implanté sur un site voisin, l'influence des rejets atmosphériques de carbone-14 d'Orano, qui pourrait constituer la seconde contribution à cette dose totale, ne peut être discernée dans les résultats des mesures environnementales.

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



Vue aérienne du site du Tricastin

© Orano

Le site de Romans-sur-Isère

Localisé dans la vallée de l'Isère, le site Framatome de Romans-sur-Isère comporte deux installations nucléaires de base (figure 1). La première installation (INB 63) est spécialisée dans la fabrication d'éléments de combustible pour les réacteurs de recherche. La seconde installation (INB 98) est l'unité de fabrication des combustibles nucléaires destinés aux réacteurs à eau pressurisée. Ainsi, en 2019, cette INB a transformé 641 tonnes d'uranium enrichi en assemblages de combustible.

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 depuis 2010 et atteignent 0,00006 GBq/an entre 2017 et 2019.

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. Ainsi, en milieu 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 milieu terrestre, des végétaux (feuilles d'arbres, herbe, mousses terrestres) et des denrées (blé) sont prélevés dans les zones influencées par les rejets atmosphériques du site (sud et nord du site) et en dehors de l'influence des rejets. En complément, des prélèvements (aérosols et feuilles d'arbres) et des mesures sont également effectués sur le site, pour évaluer les conséquences des rejets atmosphériques à proximité des installations. Enfin, l'eau de la nappe phréatique est mesurée en 12 points de prélèvement situés dans l'environnement du site Framatome.

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

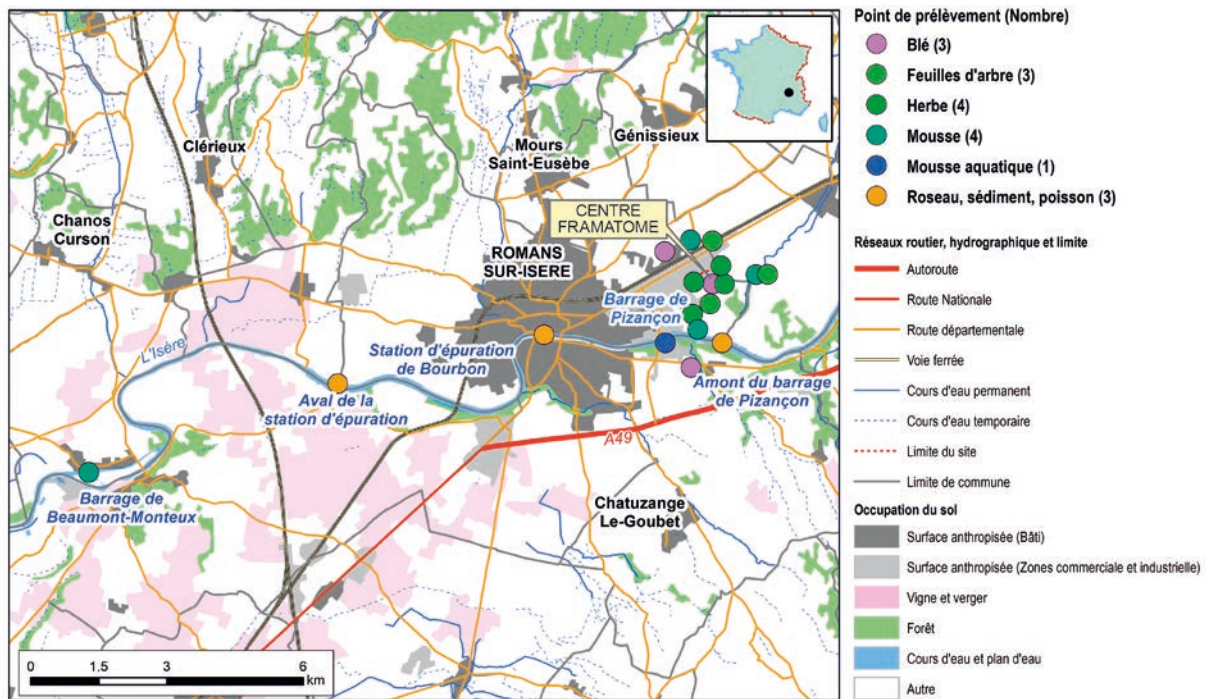
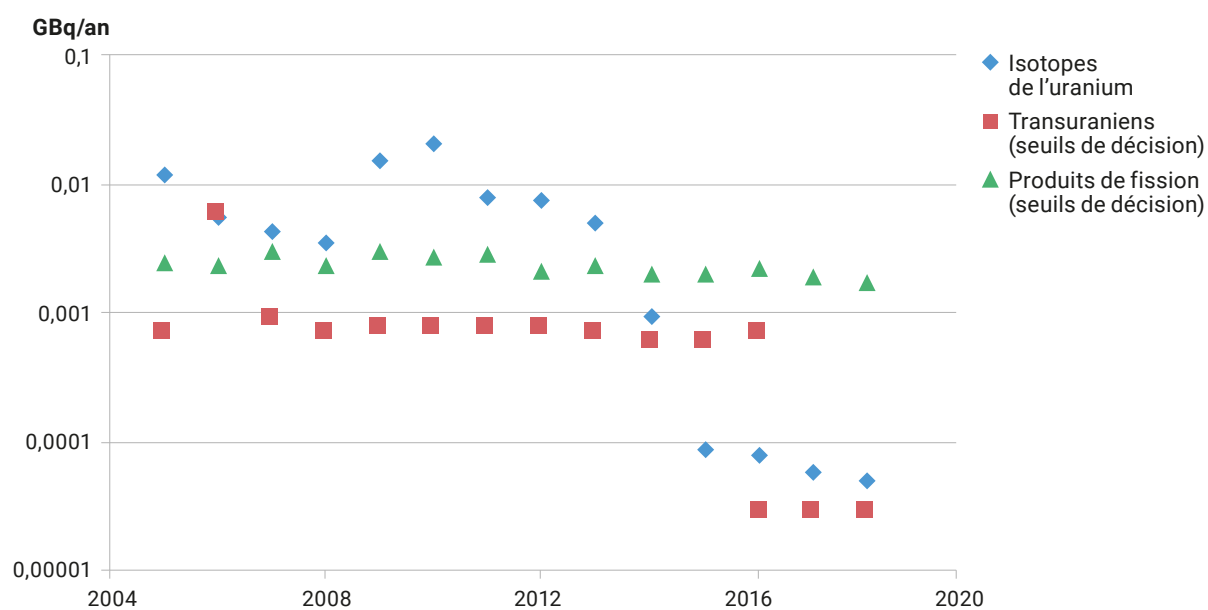


FIGURE 2 / CHRONIQUE DES REJETS LIQUIDES DU SITE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE (en GBq/an)



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



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 0,03 et 0,04 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ et entre 0,25 et 0,38 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour l'uranium-235 et l'uranium-238, respectivement (tableau 1). Lors des périodes précédentes, les activités en uranium-238 étaient plus élevées : de 1,5 à 2,1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (en 2011-2014) et de 0,9 à 1,1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (en 2015-2017). Ainsi, la baisse des rejets se traduit par une diminution de l'activité volumique de l'air (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 valeurs montrent que les activités volumiques de ce radionucléide dans l'air se rapprochent progressivement du fond radiologique.

Les activités en uranium mesurées dans les feuilles d'arbres proviennent du dépôt des 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 20 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$ (figure 4). En comparaison, la concentration massique moyenne en uranium est plus faible à l'est du site (9,4 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$). Ces activités massiques sont plus faibles que celles observées au cours de la période précédente (2014-2017), qui étaient de 47 et 17 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$ dans les feuilles prélevées au sud et à l'est du site, respectivement. Comme pour les aérosols présentés auparavant, la baisse des niveaux d'activités observés dans les feuilles d'arbres du site entre les deux périodes d'observation provient vraisemblablement de la diminution des activités en uranium rejetées.

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 2). Ainsi, dans l'herbe, la concentration massique en uranium est en moyenne plus élevée au sud (7,1 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$) en comparaison de l'est (3,3 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$), du nord (4,5 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$) et de l'ouest (5,1 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$). 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 (78 à 79 $\mu\text{g}/\text{kg sec}$).

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 sont très proches en amont et en aval (1,63 et 1,68 $\mu\text{g}/\text{L}$, respectivement). Dans les échantillons de la nappe phréatique, 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 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 3). Ainsi, dans les roseaux, les mousses, les sédiments et les poissons, les activités de chaque isotope de l'uranium (uranium-234, uranium-235 et uranium-238) en amont et en aval sont très proches l'une de l'autre (uranium-238 dans les sédiments : 36 et 29 $\text{Bq}/\text{kg sec}$, respectivement). De plus, en dépit d'activités annuelles en uranium rejetées plus élevées que dans l'atmosphère, les analyses effectuées en milieu aquatique ne révèlent pas la présence de l'uranium-236, isotope artificiel de l'uranium.

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 conduirait à une dose maximale consécutive à l'inhalation des poussières d'uranium de 0,03 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette valeur est plus faible que celle qui a été estimée lors de la précédente période d'observation (2015-2017 : 0,15 $\mu\text{Sv}/\text{an}$) car, comme signalé, les rejets en uranium sont en baisse. Ces estimations sont probablement majorantes de celles reçues par la population avoisinante du fait qu'elles s'appuient sur des mesures réalisées sur le site même et non pas dans son environnement.

TABLEAU 1 / ACTIVITÉS MOYENNES DES ISOTOPES DE L'URANIUM DANS LES AÉROSOLS PRÉLEVÉS SUR LE SITE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE ENTRE 2018 ET 2020 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)

	^{234}U ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	^{235}U ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	^{236}U ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	^{238}U ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)
Est	< 10	0,03	< 0,18	0,25
Nord	< 10	0,03	< 0,17	0,29
Ouest	< 9,3	0,03	< 0,16	0,38
Sud	< 8,9	0,04	< 0,15	0,38

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

Localisation des prélèvements		Nord	Est	Sud	Ouest
Herbe	Distance site (m)	200	200	750	1 200
	Uranium ($\mu\text{g}/\text{kg sec}$)	4,5	3,3	7,1	5,1
Mousses terrestres	Distance site (m)	750	1 000	1 250	
	Uranium ($\mu\text{g}/\text{kg sec}$)	79	78	78	
Blé	Distance site (m)		200	2 000	
	Uranium ($\mu\text{g}/\text{kg sec}$)		4,7	2,6	

FIGURE 4 / CONCENTRATION PONDÉRALE EN URANIUM DANS LES AIGUILLES DE PIN PRÉLEVÉES SUR LE SITE DE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE ENTRE 2011 ET 2020 (en $\mu\text{g}/\text{kg sec}$)

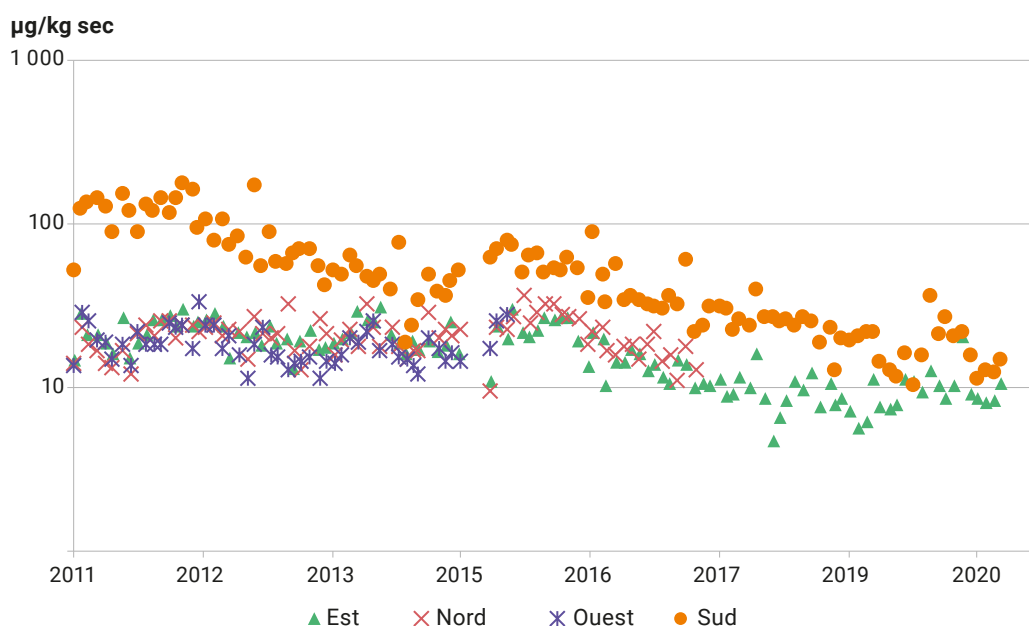


TABLEAU 3 / ACTIVITÉ MOYENNE DES ISOTOPES DE L'URANIUM MESURÉE DANS LES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS DANS L'ISÈRE EN AMONT ET EN AVAL DE L'ÉMISSAIRE DES REJETS DU SITE FRAMATOME DE ROMANS-SUR-ISÈRE

		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	0,012 ± 0,002		0,024 ± 0,004		
	²³⁵ U	0,0005 ± 0,00007		0,0011 ± 0,0001		
	²³⁶ U	< 0,00002		< 0,00002		
	²³⁸ U	0,011 ± 0,001		0,023 ± 0,003		
Mousses aquatiques (Bq/kg frais)	²³⁴ U		5,4		3,3	
	²³⁵ U		0,3		0,2	
	²³⁶ U		< 0,03		< 0,021	
	²³⁸ U		7,5		3,4	
Sédiment (Bq/kg sec)	²³⁴ U	36 ± 4,2		35 ± 4,2		
	²³⁵ U	1,6 ± 0,2		1,3 ± 0,2		
	²³⁶ U	< 0,008		< 0,004		
	²³⁸ U	36 ± 4,6		29 ± 3,7		
Poissons (Bq/kg frais)	²³⁴ U	< 0,05		< 0,06	< 0,06	
	²³⁵ U	0,00007 ± 0,000002		0,00008 ± 0,000002	0,0001 ± 0,000003	
	²³⁶ U	< 0,0005		< 0,0006	< 0,0006	
	²³⁸ U	0,001 ± 0,0004		0,002 ± 0,0004	0,003 ± 0,0003	



Vue aérienne du site de Romans-sur-Isère

© © Framatome

Le site de La Hague

Les installations du site d'Orano Recyclage (anciennement Areva NC puis Orano Cycle) de 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 démantèlement-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 de La Hague. Les activités rejetées annuellement sont assez constantes dans le temps depuis la fin des années 1990. Le krypton-85 prédomine très largement, devant le tritium et le carbone-14. L'iode-129 vient ensuite comme principal contributeur aux rejets d'iodes. Les autres radionucléides émetteurs $\beta\gamma$, 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 à environ 5 kilomètres au large du port de Goury.

FIGURE 1 / PHOTO AÉRIENNE DES SITES D'ORANO DE LA HAGUE ET DU CSM DE L'ANDRA

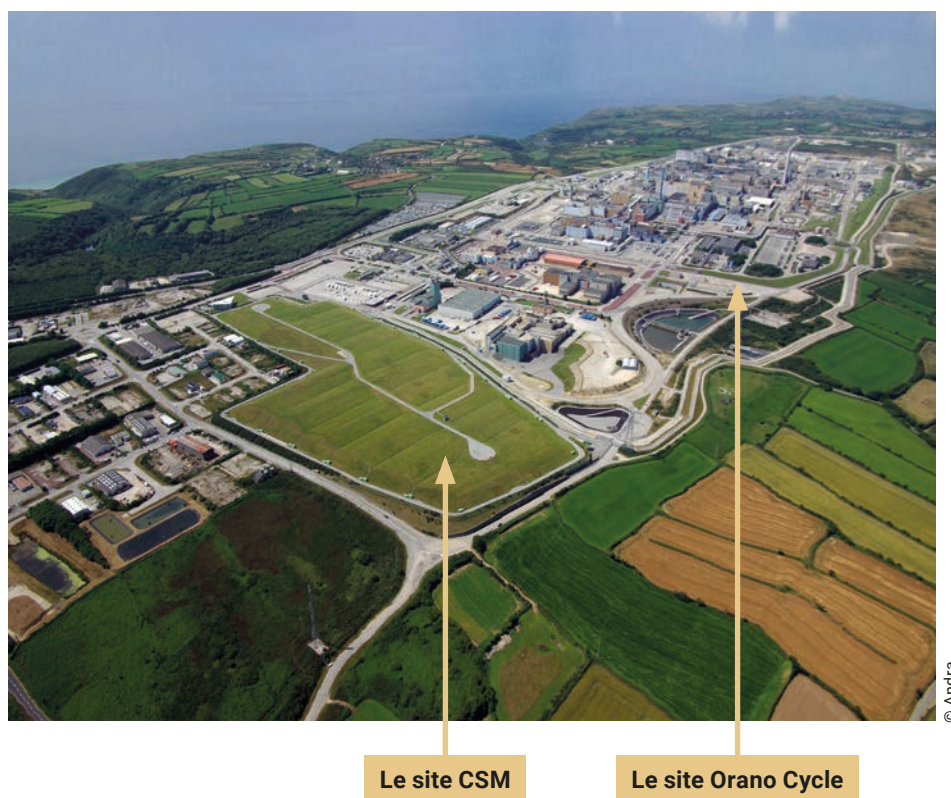


FIGURE 2 / BILAN DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES DES INSTALLATIONS D'ORANO DE LA HAGUE (TBq/an)

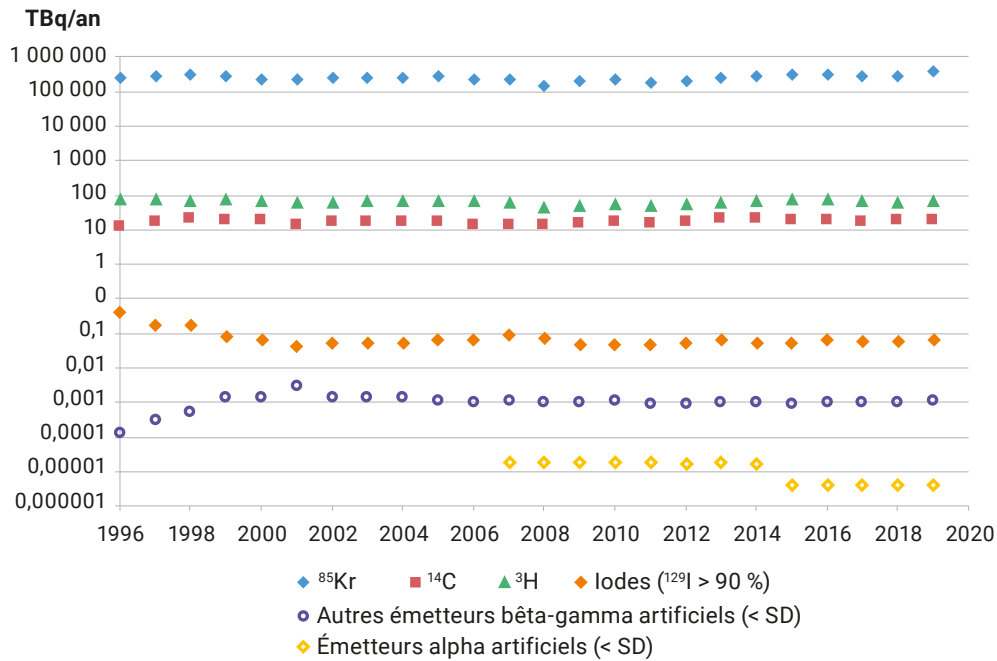


FIGURE 3 / BILAN DES REJETS LIQUIDES DES INSTALLATIONS D'ORANO DE LA HAGUE (TBq/an)

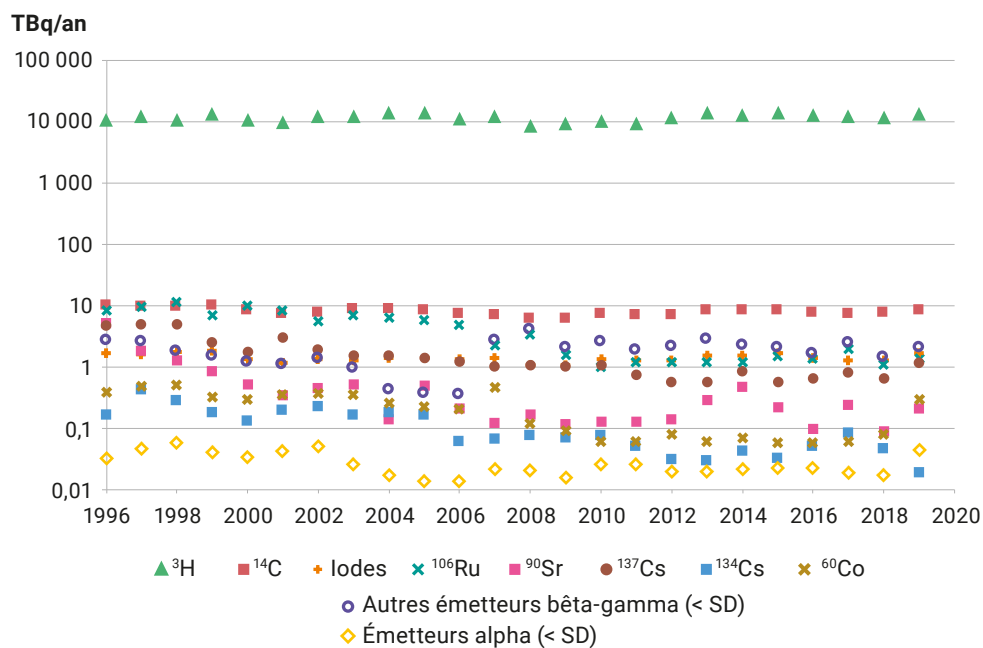
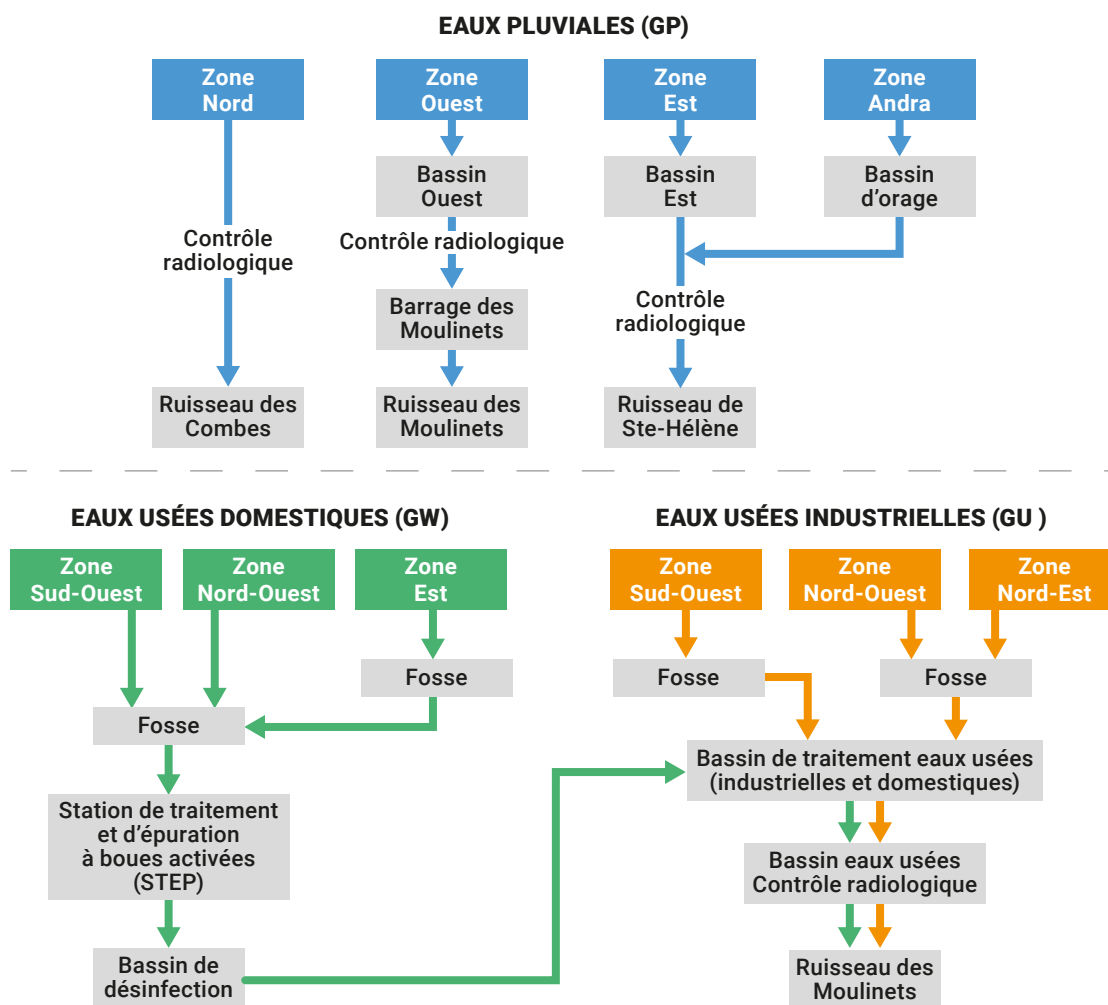


FIGURE 4 / LES REJETS D'EAUX PLUVIALES ET D'EAUX USÉES DU SITE ORANO DE LA HAGUE



Les eaux pluviales 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.

En ce qui concerne les effluents liquides du Centre de la Manche, aujourd'hui couvert et végétalisé, les eaux de drainage sont collectées et envoyées vers le site Orano pour rejets en mer. Les activités concernées sont négligeables au regard de celles rejetées par Orano. Le principal radionucléide rejeté par voie liquide est le tritium (1,7 GBq en 2019).

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

Les tableaux 1 et 2 détaillent le plan de la surveillance réglementaire mis en œuvre par Orano et l'IRSN dans l'environnement de l'établissement de 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 est particulièrement étendu.

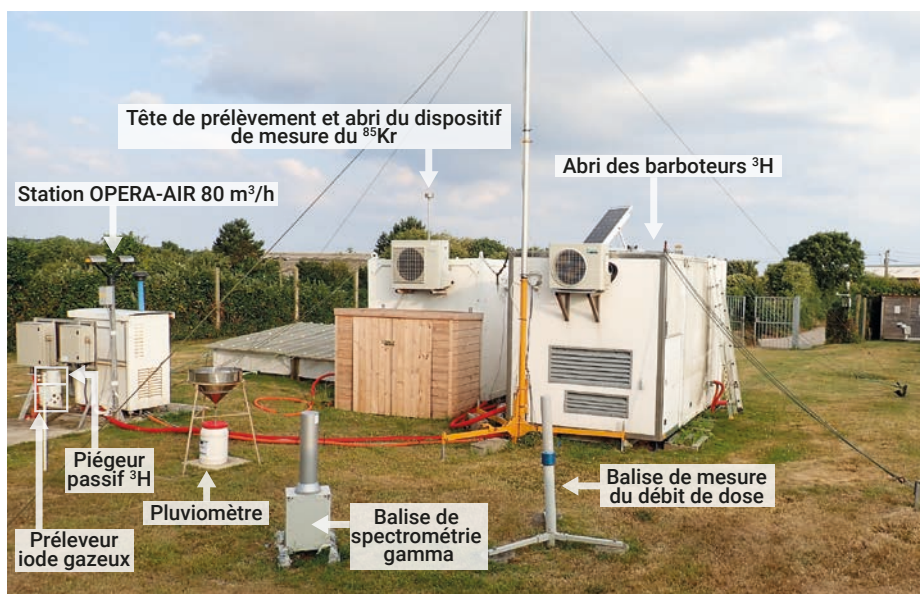
La figure 5 permet de localiser les points de surveillance où sont prélevés les échantillons des milieux

terrestres, aquatiques continentaux et atmosphériques. La figure 6 détaille la localisation des sites de prélèvements marins.

Étant donné les forts courants marins à proximité de la conduite de rejet de 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. Ainsi, les mesures réalisées par EDF autour des CNPE marins (Flamanville, Penly, Paluel et Gravelines) et par l'IRSN, font état de l'étendue de cette influence. Sur la figure 6, les zones de prélèvements marins réalisés entre la presqu'île du Cotentin et la frontière avec la Belgique sont représentées.

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	5 points : 2 sur la côte, 3 au large ; mesures ^3H libre, ^{129}I quotidienne (anse des Moulinets), spectro α et ^{90}Sr mensuelles ou trimestrielles	4 points de prélèvement à fréquence semestrielle à mensuelle ; mesures ^3H libre, spectro γ (^{137}Cs) trimestrielle sur 1 point
Algues	6 points de prélèvements pour 24 échantillons par an ; mesures ^{14}C , ^{129}I , spectro γ , spectro α	3 points de prélèvements à fréquence trimestrielle ; mesures spectro γ , ^{90}Sr , spectro α (Pu/Am/Cm)
Poissons	3 points de prélèvement pour 24 échantillons par an ; mesures ^{14}C , ^{129}I , spectro γ , spectro α	3 prélèvements annuels ; mesures spectro γ , ^{90}Sr , spectro α (Pu/Am)
Mollusques	5 et 6 points de prélèvement pour 40 à 50 échantillons par an ; mesures ^{14}C , ^{129}I , spectro γ , spectro α	3 prélèvements semestriels à trimestriels ; mesures spectro γ , spectro α (Pu/Am/Cm)
Crustacés	3 points de prélèvement pour 12 échantillons par an ; mesures ^{14}C , ^{129}I , spectro γ	



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

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

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Orano	Andra	IRSN
Air au niveau du sol	<ul style="list-style-type: none"> 5 stations ; mesures α et β-global sur filtre quotidien Spectrométrie γ si β-global > 2 mBq/m³ Spectrométrie α sur cumul mensuel de filtres, lodes sur cartouche hebdomadaire, ³H hebdomadaire, ¹⁴C bimensuelle, ⁸⁵Kr mensuelle 	<ul style="list-style-type: none"> 1 station ; mesures α et β-global sur filtre quotidien, ³H hebdomadaire 2 points de mesures de l'activité volumique en radon à fréquence mensuelle 	<ul style="list-style-type: none"> 1 station (nord du site) ; mesures spectro γ, α global, β global 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 (piéteur-passif)
Dosimètre	<ul style="list-style-type: none"> 11 points à la clôture, mesures mensuelles 	<ul style="list-style-type: none"> 11 points dont 8 en bordure du domaine public, mesures mensuelles 	-
Pluie	<ul style="list-style-type: none"> 2 stations ; mesures hebdomadaires ³H libre α et β-global et spectro γ si comptage α ou β significatif 	<ul style="list-style-type: none"> 1 station ; mesures ³H libre, α et β-global hebdomadaires 	<ul style="list-style-type: none"> 1 station ; mesures ³H libre mensuelles
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> 53 piézomètres dont une douzaine hors du périmètre du site ; mesures α et β-global, ³H libre mensuelles 	<ul style="list-style-type: none"> 49 piézomètres ; mesures α et β-global, ³H total mensuelles Spectro γ, ¹⁴C, ³⁶Cl, ⁹⁰Sr, ⁹⁹Tc, Pu/Am annuelle sur les piézomètres extérieurs 	-
Eaux de consommation	<ul style="list-style-type: none"> 12 points ; mesures α et β-global, ³H libre mensuelles 	-	-
Eaux de sources et ruisseaux	<ul style="list-style-type: none"> 7 points pour mesures α et β-global, ³H libre, spectro γ hebdomadaires ou semestrielles Sur 4 ruisseaux, mesures spectro γ et ⁹⁰Sr mensuelles 	<ul style="list-style-type: none"> 5 points ; mesures α et β-global, ³H total hebdomadaires Sur 2 points ; spectro γ, ¹⁴C, ³⁶Cl, ⁹⁰Sr, ⁹⁹Tc, Pu/Am annuelles 	<ul style="list-style-type: none"> 6 points de prélèvement à fréquence semestrielle ou trimestrielle ; mesures ³H libre, spectro γ, α global, β global, ⁹⁰Sr
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 7 points de prélèvement ; mesures spectro γ trimestrielles 	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement ; mesures spectro γ, spectro α (Pu/Am), ⁹⁰Sr
Herbes	<ul style="list-style-type: none"> 10 points ; mesures ³H lié, ¹⁴C, ¹²⁹I, spectro γ mensuelle ou trimestrielle, spectro α annuelle 	<ul style="list-style-type: none"> 2 points aux niveaux de la couverture, spectro γ mensuelle 	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvement à fréquence trimestrielle ; mesures spectro γ, ³H libre et lié, ¹⁴C
Lait	<ul style="list-style-type: none"> 5 points ; mesures ³H libre, ¹⁴C, ¹²⁹I, ⁹⁰Sr, spectro γ mensuelle 	-	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvements à fréquence semestrielle ; mesures spectro γ, ³H libre, ¹⁴C, ¹²⁹I, ⁹⁰Sr
Viande	<ul style="list-style-type: none"> 2 à 3 échantillons par an ; mesures ³H libre et lié, ¹⁴C, ¹²⁹I, spectro γ, spectro α et ⁹⁰Sr sur un échantillon 	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement annuel ; mesures ³H lié, ¹⁴C, spectro γ, ⁹⁰Sr (arrêté en 2019)
Autres denrées (légumes, œufs, miel, champignons...)	<ul style="list-style-type: none"> 10 à 12 échantillons par an ; mesures ³H lié, ¹⁴C, ¹²⁹I, spectro γ, 1 spectro α/an (Pu, ²⁴⁴Cm) et ⁹⁰Sr 	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement de céréales annuel ; spectro γ, ³H lié, ¹⁴C, ⁹⁰Sr
Plantes de cours d'eau	<ul style="list-style-type: none"> 3 points pour 12 prélèvements par an ; mesures ³H lié, spectro γ 	-	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement ; mesures spectro γ, spectro α (Pu/Am et Cm), ⁹⁰Sr
Sédiments/sables de plage	<ul style="list-style-type: none"> 26 points : 10 marins et 13 de basse mer ; mesures spectro γ, spectro α trimestrielles 	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvements ; spectro γ trimestrielles ¹⁴C, ³⁶Cl, ⁹⁰Sr, ⁹⁹Tc, Pu/Am annuelles sur un point 	<ul style="list-style-type: none"> 7 points de prélèvement à fréquence semestrielle ou trimestrielle ; mesures spectro γ, ⁹⁰Sr, spectro α (Pu/Am et Cm sur 3 échantillons)



FIGURE 5 / LOCALISATION DU SITE DE LA HAGUE, DES COMMUNES ET DES STATIONS SUR LESQUELLES SONT PRÉLEVÉS LES ÉCHANTILLONS TERRESTRES ET ATMOSPHÉRIQUES

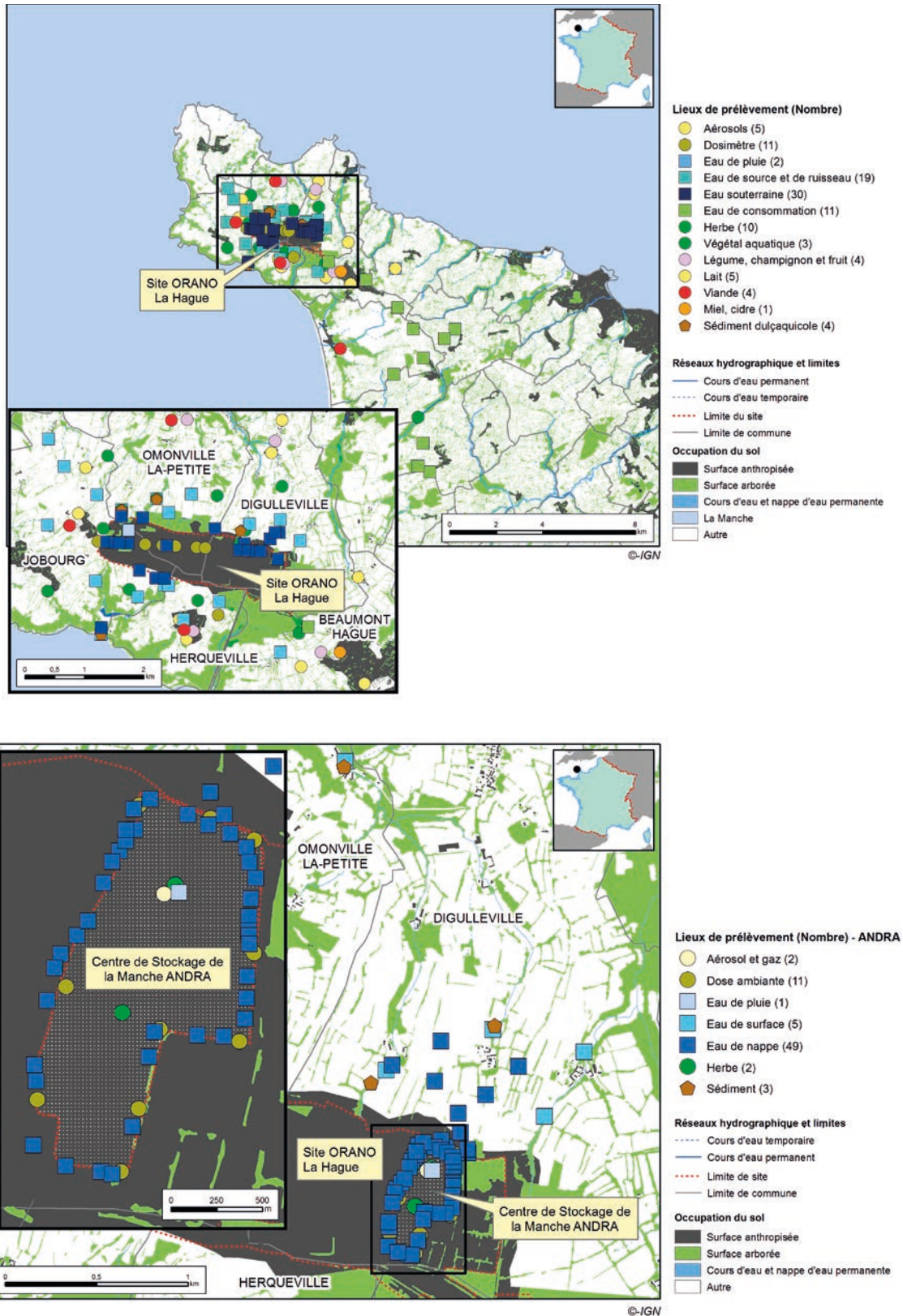
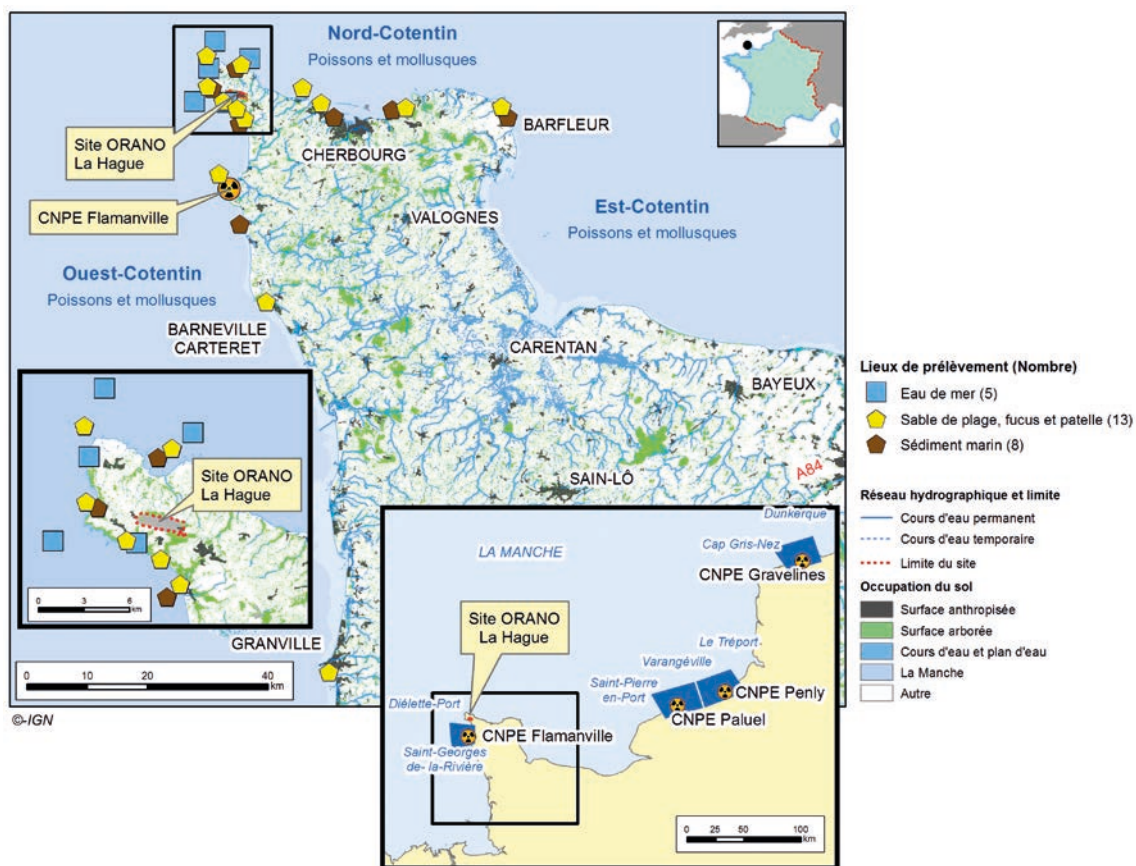


FIGURE 6 / LOCALISATION DES SITES DE PRÉLÈVEMENTS MARINS AUTOUR DE LA HAGUE



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

© 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 tous les milieux.

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 milieu terrestre et notamment sur les denrées.

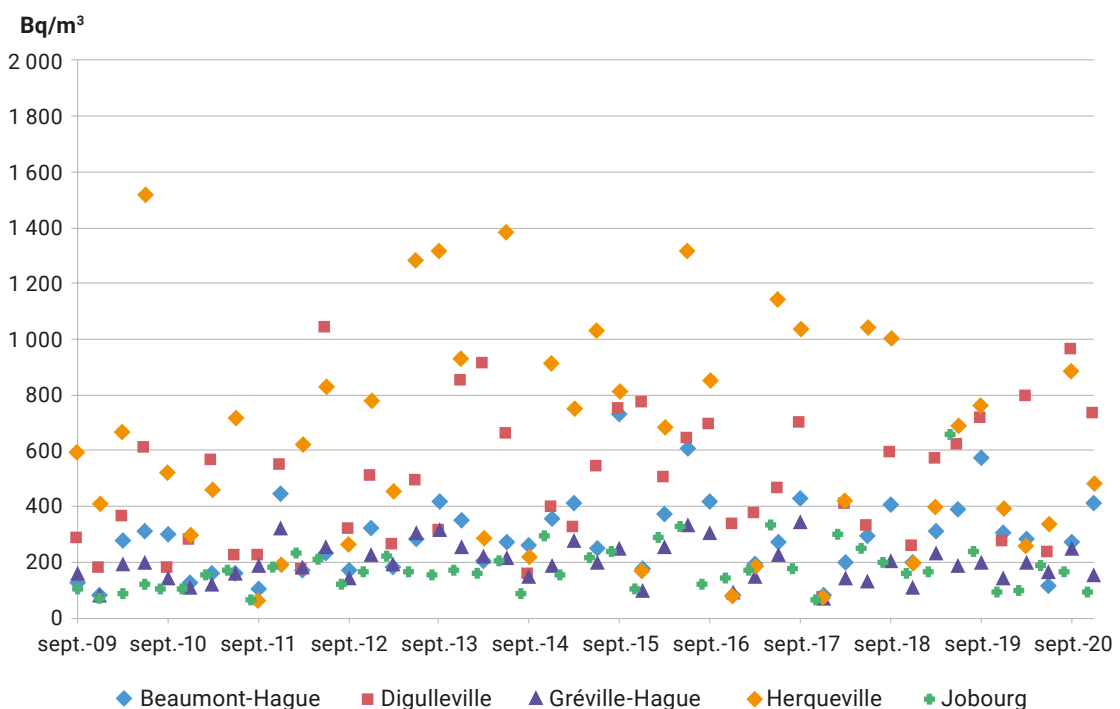
Il est régulièrement mesuré au niveau des cinq stations villages situées autour du site de La Hague : Beaumont-Hague, Digulleville, Gréville-Hague, Herqueville et Jobourg.

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 2018 à 2020, de l'ordre de 220 Bq/m³ à Jobourg et jusqu'à 570 Bq/m³ autour d'Herqueville (figure 7). Ces activités sont dans les mêmes ordres de grandeur que celles mesurées pour la période 2015-2017. Pour les habitants de ces communes, ce gaz rare génère exclusivement une exposition externe. Les doses efficaces estimées du fait de ces activités sont de 1,7 µSv/an à Jobourg, 2,5 µSv/an à Beaumont-Hague, 4,3 µSv/an à Digulleville et jusqu'à 4,6 µSv/an à Herqueville. Ces doses sont tout à fait conformes à celles évaluées par Orano sur la base des rejets de 2019 : 1,4 µSv/an pour un adulte qui habiterait à Goury et 9,6 µSv/an pour une personne résidant dans le canton de Digulleville.

Les « bouffées » de krypton-85 occasionnent régulièrement des augmentations, parfois importantes mais très fugaces, du débit d'équivalent de dose gamma ambiant. 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 5,5 µSv en 2018 et à 4,5 µSv en 2019, 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 DU KRYPTON-85 MESURÉES MENSUELLEMENT DANS L'AIR AUX CINQ STATIONS VILLAGES SITUÉES AUTOUR DU SITE DE LA HAGUE (Bq/m³) DEPUIS SEPTEMBRE 2009



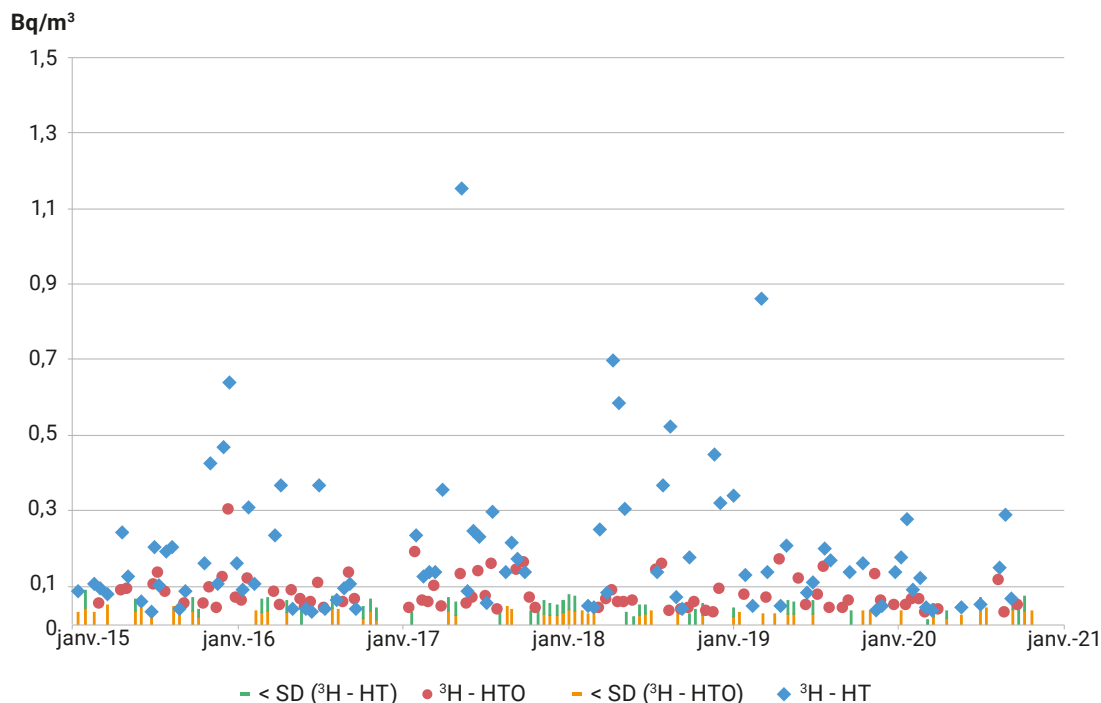
Le tritium

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 du tritium est rejetée sous forme gazeuse. L'influence de ces rejets gazeux est nettement visible en milieu atmosphérique.

En raison des seuils de décisions utilisés par Orano pour la surveillance de routine (de l'ordre de 0,4 Bq/m³, soit 40 fois le bruit de fond du tritium dans l'air, naturel et hérité des essais nucléaires), 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. Entre 2018 et 2020, c'est à la station d'Herqueville, située au sud-est de l'usine, que le nombre de valeurs significatives⁽¹⁾ est le plus élevé (moins de 2 % des valeurs supérieures au SD de 0,4 Bq/m³). 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 en tritium dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau (HTO) pour le barboteur et le piègeur passif et d'hydrogène tritié (HT) pour le barboteur (figure 8), ce qui permet d'acquérir un nombre plus conséquent de valeurs significatives (> 60 %). Ainsi, entre 2018 et 2020, l'activité volumique moyenne en HT est de 0,2 Bq/m³ et l'activité moyenne en HTO est de 0,07 Bq/m³ à Omonville-la-Petite. L'activité volumique moyenne déterminée en HTO, à Herqueville, grâce au piègeur passif est de 0,06 Bq/m³. Les activités mesurées sont du même ordre de grandeur que celles mesurées entre 2015 et 2017.

FIGURE 8 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM (HT et HTO) DANS L'ATMOSPHÈRE MESURÉES À LA STATION IRSN D'OMONVILLE-LA-PETITE DEPUIS 2015 (Bq/m³)



(1) La notion de « valeur significative » implique ici une valeur mesurée supérieure au seuil de décision (SD). Cette notion est valable pour tout le reste du document.

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 30 Bq/L. La moyenne de l'activité en tritium dans l'eau de pluie à Omonville-la-Petite, entre 2018 et 2020, est de 6,5 Bq/L, à comparer à un bruit de fond de 1 Bq/L dans une gamme de 0,5 à 2 Bq/L observée sur la période. Ce résultat est parfaitement cohérent avec celui obtenu dans l'air pour la partie HTO.

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 moins de 0,01 $\mu\text{Sv}/\text{an}$), mais également dans le cas du tritium sous forme HTO une exposition interne par voie transcutanée (la dose efficace est estimée à moins de 0,005 $\mu\text{Sv}/\text{an}$). La dose totale due au tritium atmosphérique est donc inférieure à 0,015 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette dose est du même ordre de grandeur quoiqu'inférieure à celles évaluées par Orano à partir des rejets de 2019 : 0,03 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un adulte qui habiterait à Goury et 0,09 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour une personne résidant dans le canton de 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 faibles niveaux d'activités massiques de tritium organiquement lié mesurés dans l'herbe résultent de ces activités atmosphériques. Suivant les stations de prélèvement, les valeurs moyennes calculées sur la période 2018 à 2020 sont de l'ordre de 3 à 3,9 Bq/kg frais⁽²⁾ (figure 10), soit des valeurs supérieures au bruit de fond radiologique.

La répartition spatiale des activités mesurées est cohérente avec la rose des vents du site (figure 21 p. 185).

Dans les légumes feuilles (poireau, chou-fleur, persil...), les activités massiques mesurées du tritium organiquement lié, comprises entre 0,23 et 0,78 Bq/kg frais (voir note de bas de page précédente), sont supérieures au bruit de fond (0,03 Bq/kg frais). La mesure du tritium libre a été réalisée sur seulement deux échantillons de chou-fleur. Les deux échantillons présentaient des valeurs significatives entre 3 et 5 fois la valeur du bruit fond (0,9 Bq/kg frais). Dans les légumes racines (carotte et pomme de terre), la valeur moyenne est de 1 Bq/kg frais en

tritium organiquement lié, de l'ordre du bruit de fond radiologique. Pour le tritium libre, l'activité moyenne dans les légumes racines est de 1,6 Bq/kg frais. Enfin, les mesures dans les champignons montrent des valeurs de tritium organiquement lié comprises entre 0,9 et 6,6 Bq/kg frais. Dans ces denrées, les activités moyennes mesurées en tritium organiquement lié et en tritium libre, entre 2018 et 2020, sont légèrement plus faibles que celles mesurées durant la période 2015-2017.

Les activités volumiques du tritium libre du lait sont majoritairement inférieures au seuil de décision (< 4,5 Bq/L). Entre 2018 et 2020, c'est le lait provenant de la commune de Digulleville qui présente le plus grand nombre de valeurs significatives (15 % de valeurs) avec une activité maximale de 15 Bq/L. Les moyennes des activités massiques du tritium organiquement lié quantifiées dans les viandes sur la période étudiée sont de 0,7 Bq/kg frais pour les volailles, 2 Bq/kg frais pour le mouton et 1 Bq/kg frais pour le lapin de garenne. Ces activités sont de l'ordre du bruit de fond dans ces denrées et sont inférieures aux activités mesurées en 2015-2017.

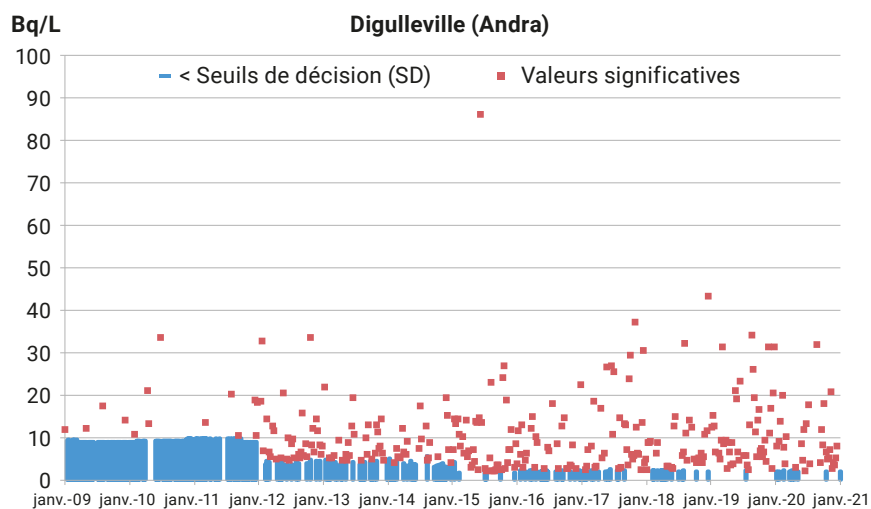
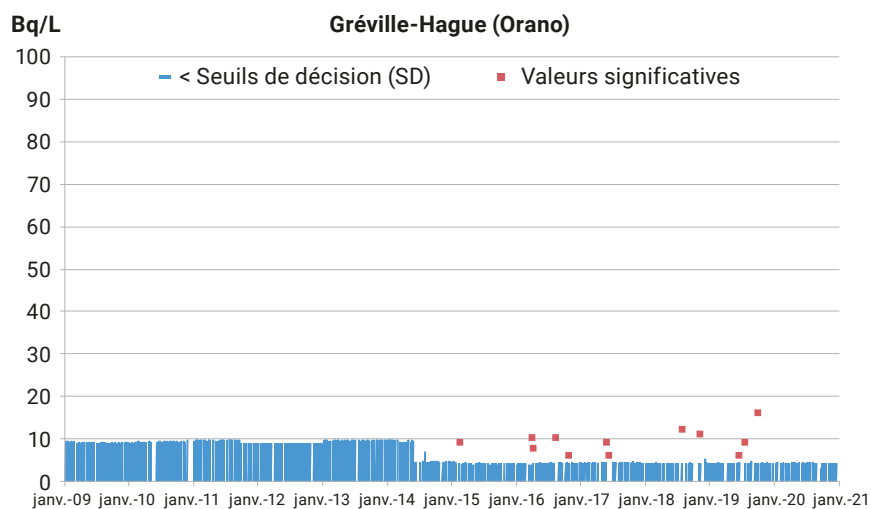
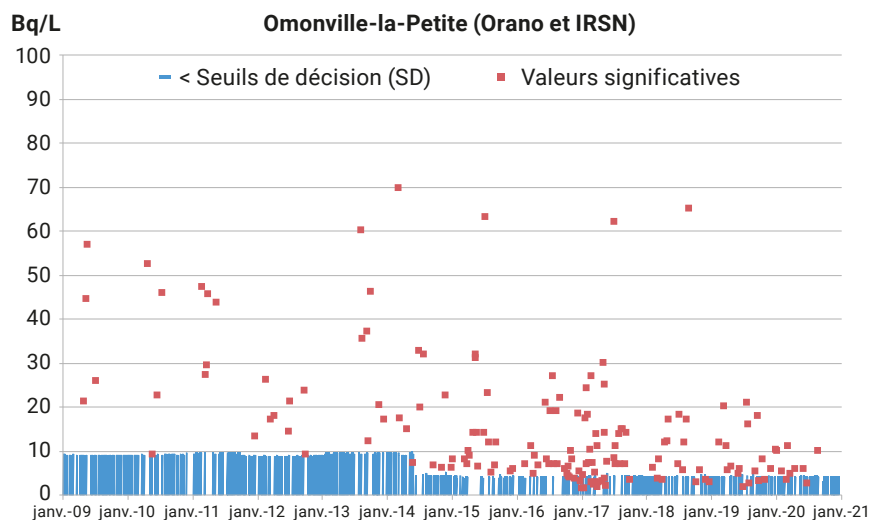
Les activités massiques moyennes du tritium organiquement lié dans le miel et les œufs prélevés sont du même ordre de grandeur (respectivement 2,9 et 2 Bq/kg frais). Ces valeurs sont proches de celles observées en 2015-2017.

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 en 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 en tritium dépassant 10 Bq/L : le ruisseau des Moulinets (source Recboc), la Sainte-Hélène et le Grand Bel avec des activités volumiques moyennes pour les données IRSN calculées sur la période 2018-2020 respectivement de 15 Bq/L, 21 Bq/L et 251 Bq/L. Ces activités sont très légèrement inférieures à celles observées sur la période 2015-2017, mais toujours nettement supérieures au bruit de fond de ce radionucléide (1 Bq/L dans une gamme allant de 0,5 à 2 Bq/L sur la période 2018-2020)

Le ruisseau de 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.

(2) 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 lié (TOL) et de tritium libre (HTO).

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



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 2018-2020, sur les 12 stations surveillées par Orano autour de l'établissement de La Hague, des activités significatives en tritium dans les eaux potables sont quantifiables. La plupart de ces mesures restent, comme sur la période 2015-

2017, inférieures à la dizaine de Bq/L. Pour autant, des activités de l'ordre de 16 à 17 Bq/L ont été mesurées sporadiquement au forage du Hameau Fabien, situé sur la commune de Beaumont-Hague, au forage du Bacchus et au forage du Houguet. Les activités moyennes relevées en HTO, sur la période 2018-2020, dans ces forages sont de l'ordre de 9 Bq/L. L'ingestion quotidienne de 2 L d'eau provenant de ces forages générerait une dose efficace de 0,12 μ Sv/an.

FIGURE 10 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES SUR LA PÉRIODE 2018-2020 DU 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)

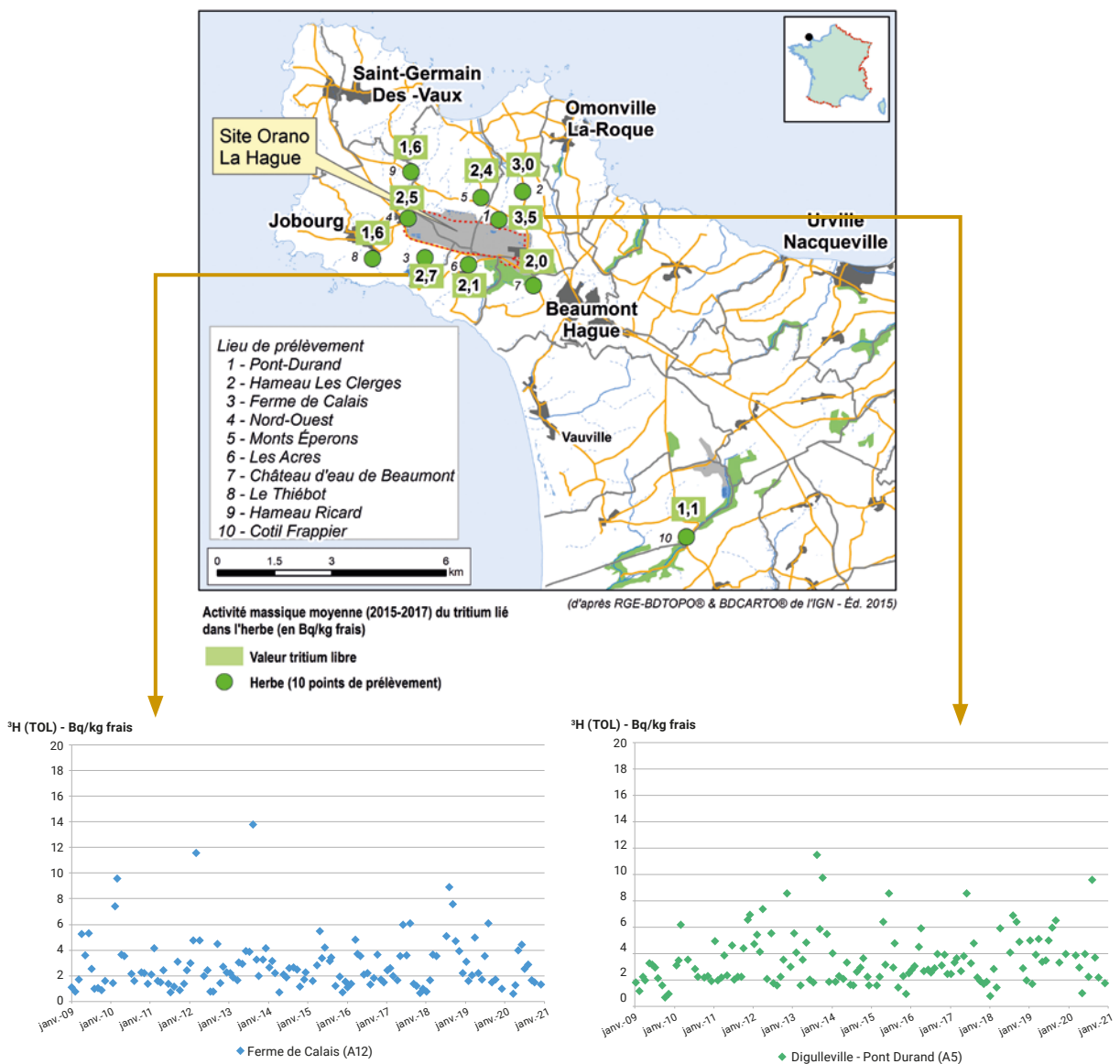
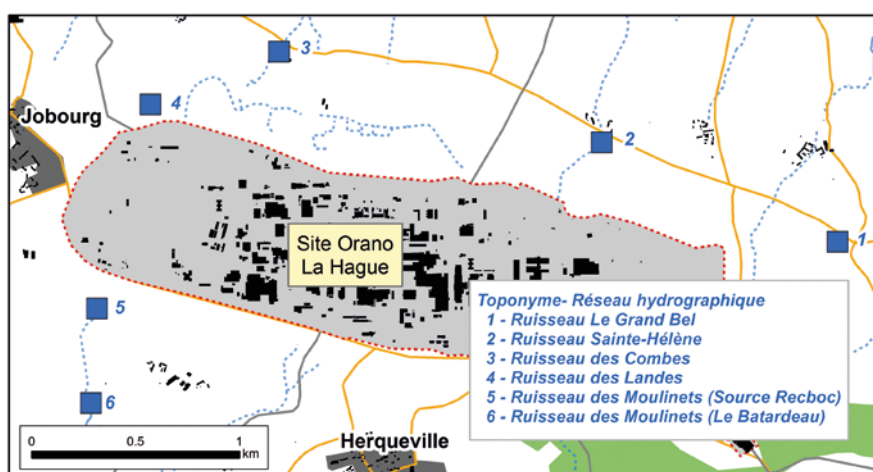
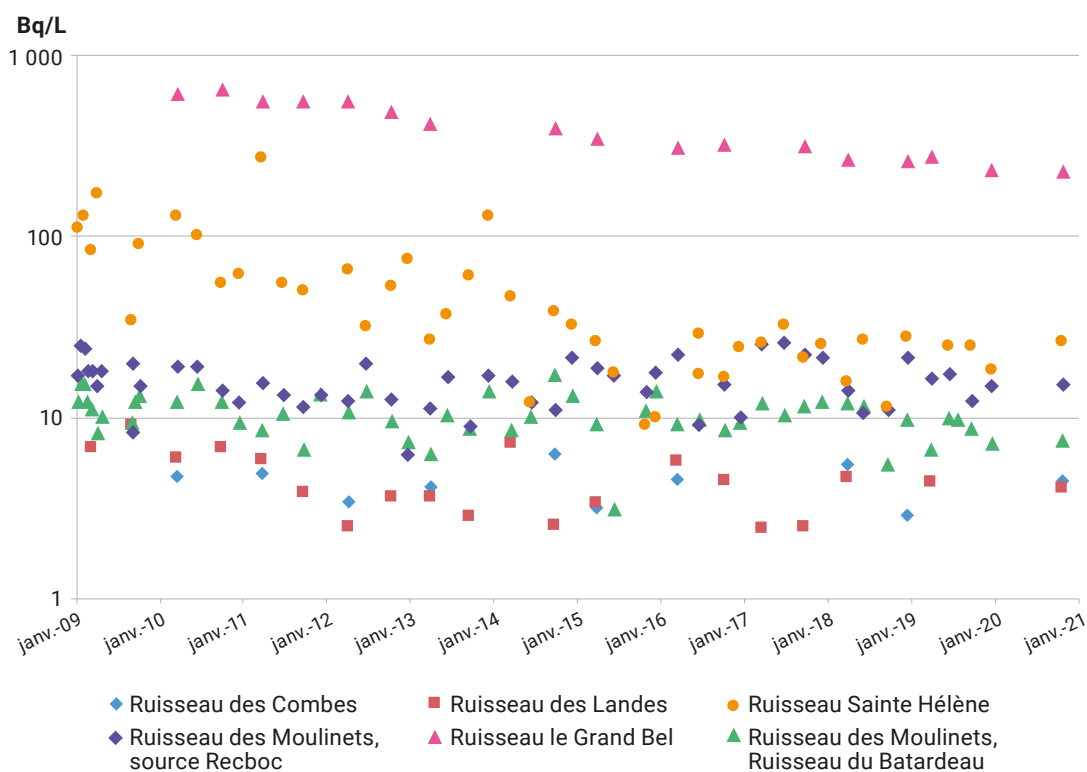


FIGURE 11 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM LIBRE (HTO) DANS LES COURS D'EAU PRÉLEVÉS SUR LES 6 POINTS DE SURVEILLANCE DE L'IRSN AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/L) DEPUIS JANVIER 2009 ET LOCALISATION DES DIFFÉRENTS RUISSEAUX



(d'après RGE-BDTopo® & BDCARTO® de l'IGN - Ed. 2015)

Les eaux de la nappe phréatique située sous le site de La Hague, et plus particulièrement du CSM, présentent un marquage par le tritium élevé (figure 12B). La nappe phréatique en aval du CSM est affectée par une contamination en tritium historique

liée à un incident sur un ouvrage de stockage détecté en 1976. L'activité volumique en tritium est actuellement proche des 40 000 Bq/L (figure 12A). L'eau de cette nappe n'est destinée à aucun usage.

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

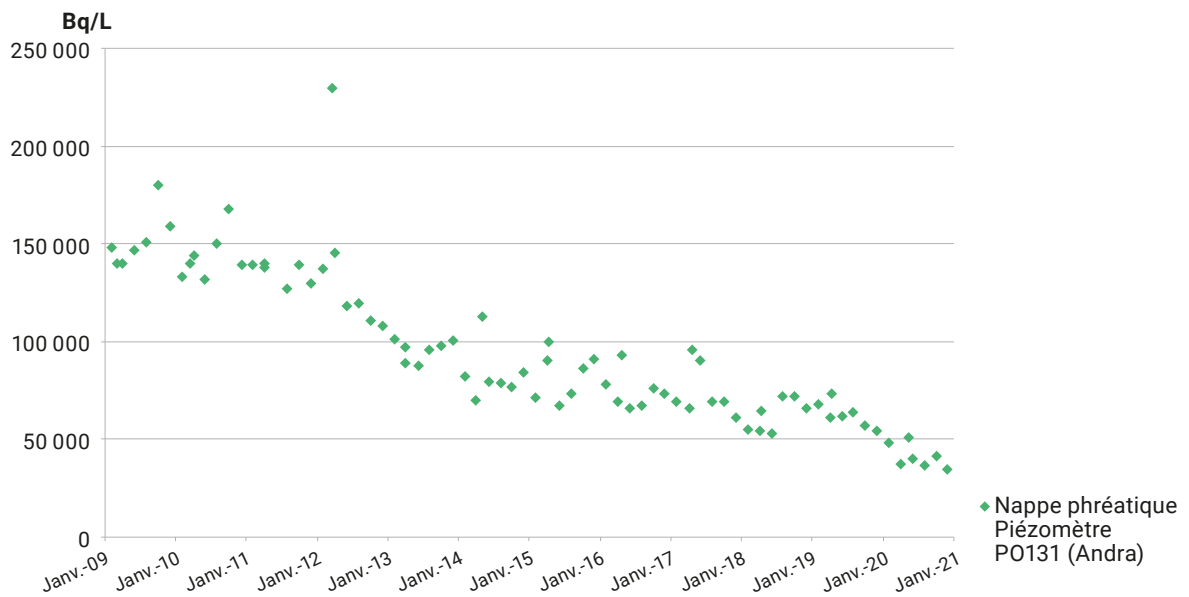
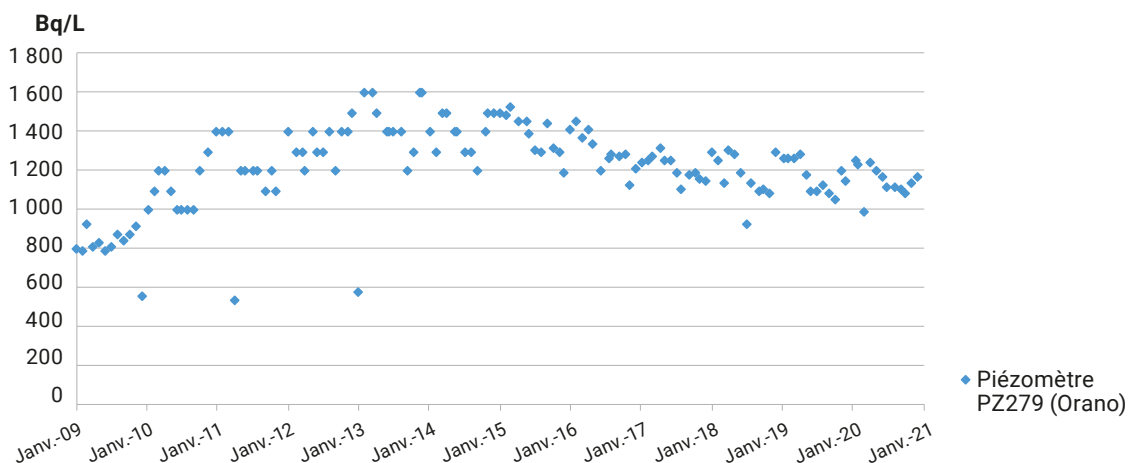


FIGURE 12B / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM TOTAL DANS LA NAPPE PHRÉATIQUE AU PIÉZOMÈTRE PZ279 (Bq/L) DEPUIS JANVIER 2009



Un autre marquage en tritium est visible à l'ouest du site, au niveau du piézomètre 279, avec une activité qui varie entre 1 000 et 1 400 Bq/L depuis 2010.

Le marquage par les rejets liquides tritiés de La Hague mais aussi, bien que dans une moindre mesure, de l'usine britannique de Sellafield, est net sur l'ensemble de la Manche.

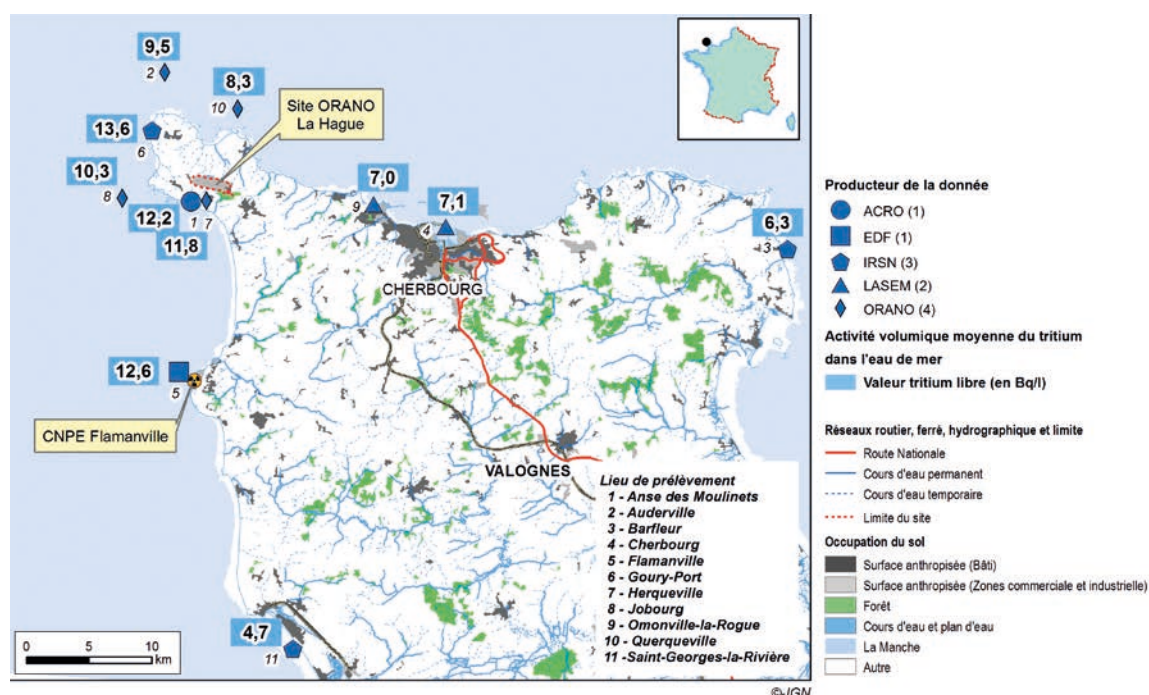
L'activité volumique moyenne du tritium total dans l'eau de mer, sur la période 2018 à 2020 (figure 13), se situe autour de 9,5 Bq/L au niveau du cap de La Hague (à comparer à un bruit de fond naturel en milieu marin de l'ordre de 0,1 à 0,2 Bq/L), de 13,6 Bq/L au port de Goury et de 11,8 Bq/L dans l'anse des moulinets. Il faut noter que ces valeurs moyennes masquent des variations très importantes en quelques heures (cf. focus du bilan radiologique IRSN de 2012). Par exemple, l'activité maximale en tritium dans l'eau de mer a été détectée dans l'anse des moulinets (74 Bq/L) en octobre 2019. Ces résultats sont dans la continuité des activités mesurées sur la période 2015-2017.

L'activité du tritium des organismes marins, végétaux et animaux étant en équilibre avec celle de l'eau, les activités massiques sont du même ordre de grandeur. Les activités massiques moyennes mesurées dans les poissons pêchés sur la côte ouest du Cotentin sont

de 0,9 Bq/kg frais pour le tritium organiquement lié et 8,9 Bq/kg frais pour le tritium libre (HTO). Quant aux mollusques, les deux échantillons de coquilles Saint-Jacques prélevés sur la côte nord du Cotentin dépassent tous le bruit de fond ; l'activité massique moyenne mesurée est de 1,6 Bq/kg frais pour le tritium lié et de 4,1 Bq/kg frais pour le tritium libre. L'échantillon d'huître prélevé sur la côte ouest du Cotentin présente une activité en TOL de 1,9 Bq/kg frais et en tritium libre de 1,9 Bq/kg frais. Les deux échantillons de patelles prélevés vers Herquemoulin présentent un niveau moyen plus élevé en TOL (3,3 Bq/kg frais) et une activité moyenne pour le tritium libre de 4,3 Bq/kg frais. Sur la période 2018-2020, un seul prélèvement de crustacés a été effectué pour y mesurer du tritium ; l'activité massique en tritium libre mesurée dans un échantillon de tourteaux est de 25,7 Bq/kg frais et l'activité massique en tritium organiquement lié est de 3,2 Bq/kg frais.

La dose potentiellement due au tritium rejeté par le site et liée à l'ingestion de denrées locales solides (légumes, poissons, viande, etc. et hors eau de boisson estimée séparément) est extrêmement faible. Elle est estimée à moins de 0,01 µSv/an pour un adulte se nourrissant d'aliments produits autour du site de La Hague, sur la base des activités moyennes mesurées dans les denrées durant la période d'observation (2018-2020).

FIGURE 13 / ACTIVITÉS MOYENNES DU TRITIUM TOTAL DANS L'EAU DE MER AU NIVEAU DE LA PRESQU'ÎLE DU COTENTIN SUR LA PÉRIODE 2018-2020 (Bq/L)



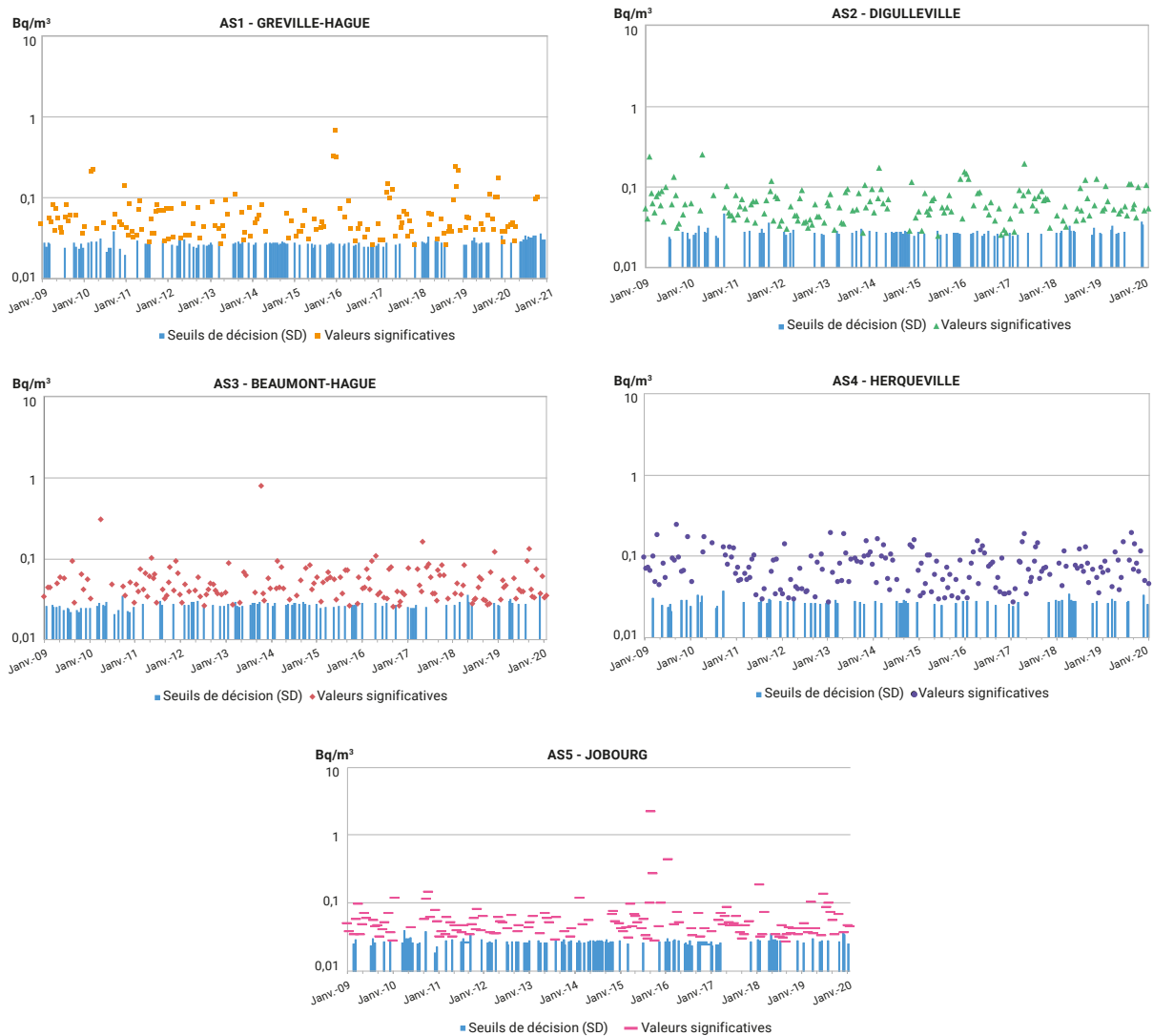
Le régime alimentaire retenu (tableau 5 chapitre 9 d'annexes) est celui d'une population de pêcheurs vivant dans le nord Cotentin. Ce dernier est représentatif d'un régime alimentaire moyen avec une consommation un peu plus importante de poissons. Les données du régime alimentaire ainsi que les données d'autoconsommation sont issues de l'enquête Crédoc. Cette dose est négligeable au regard de celles liées aux rejets de krypton-85 présentées précédemment.

Le carbone-14

L'influence des rejets de carbone-14 sous forme liquide et gazeuse (CO_2) est décelable 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 dans l'air (à l'origine des activités mesurées dans la chaîne alimentaire terrestre), fluctuent entre moins de $0,03 \text{ Bq/m}^3$ ($< \text{SD}$) et $0,24 \text{ Bq/m}^3$, soit des valeurs plus faibles que sur

FIGURE 14 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU CARBONE-14 MESURÉES DANS L'AIR AU NIVEAU DES CINQ STATIONS VILLAGES DEPUIS JANVIER 2009 AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/m^3)



la période précédente où l'activité avait dépassé 2 Bq/m³ à Jobourg, en septembre 2015. Les valeurs moyennes mesurées sur les trois dernières années, de 2018 à 2020, sont comprises entre la valeur du bruit de fond pour ce radionucléide (autour de 0,05 Bq/m³) à Digulleville et Beaumont-Hague et 0,06 Bq/m³ à Jobourg. Elle était de 0,08 Bq/m³ pour cette même station sur la période 2015-2017.

La dose liée à l'inhalation de carbone-14 (sous forme CO₂) reçue par la population résidant sur la commune de Jobourg, où l'activité volumique moyenne mesurée est la plus élevée, est inférieure à 0,001 µSv/an.

L'influence des rejets de carbone-14 est plus marquée dans les denrées, notamment dans les denrées marines (poissons, mollusques et crustacés), avec des activités massiques mesurées qui fluctuent entre le bruit de fond (de l'ordre de 20 Bq/kg frais) et 3 à 4 fois cette valeur (figures 15 à 17). Les activités

massiques moyennes mesurées entre 2018 et 2020 sont comprises entre 27,2 Bq/kg frais pour les poissons et 56 Bq/kg frais pour les crustacés, soit très proche des moyennes mesurées sur la période précédente. 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 des rejets de l'usine (au niveau de la conduite de rejet vers Goury et l'anse des Moulinets) que plus à l'est vers Barfleur ou plus au sud vers Barneville-Carteret. Cette influence est par ailleurs visible, mais dans une moindre mesure, sur toutes les côtes françaises de la Manche jusqu'à Dunkerque (figure 18).

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

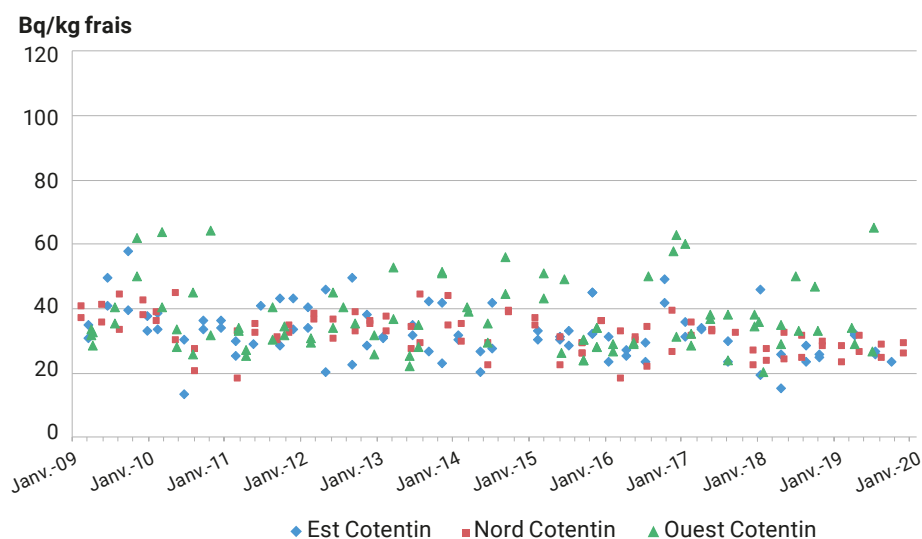


FIGURE 16 / ACTIVITÉS MASSIQUES DU CARBONE-14 DANS LES CRUSTACÉS PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS JANVIER 2009 (Bq/kg frais)

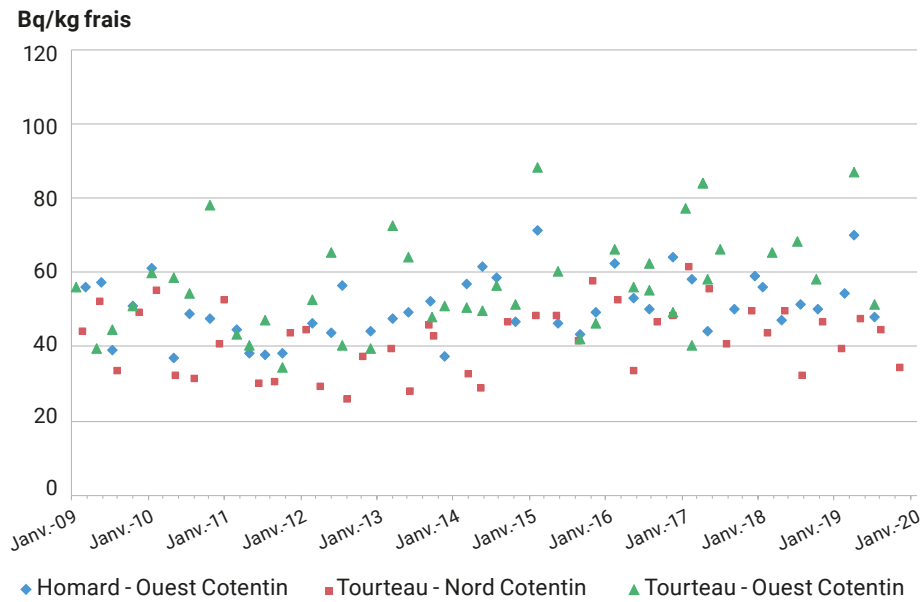


FIGURE 17 / ACTIVITÉS MASSIQUES DU CARBONE-14 DANS LES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE DEPUIS JANVIER 2009 (Bq/kg frais)

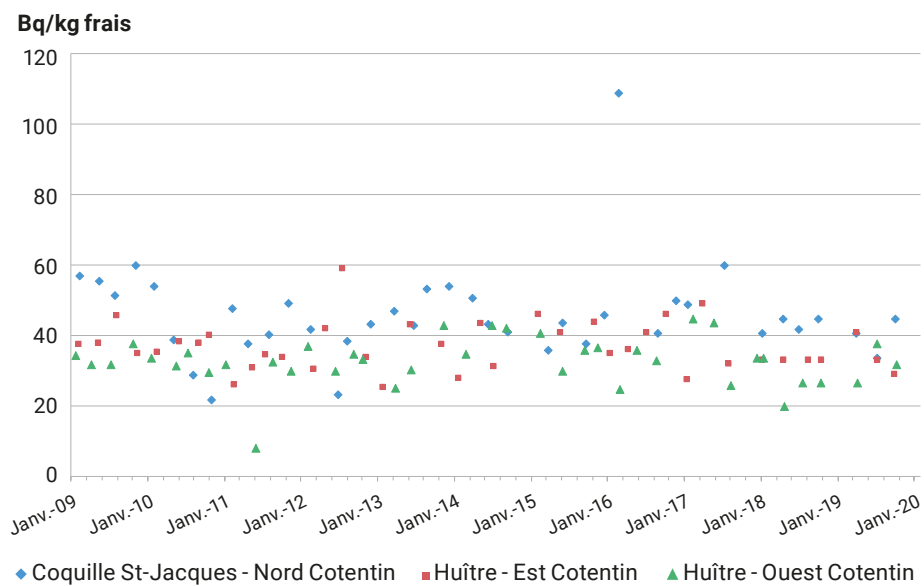
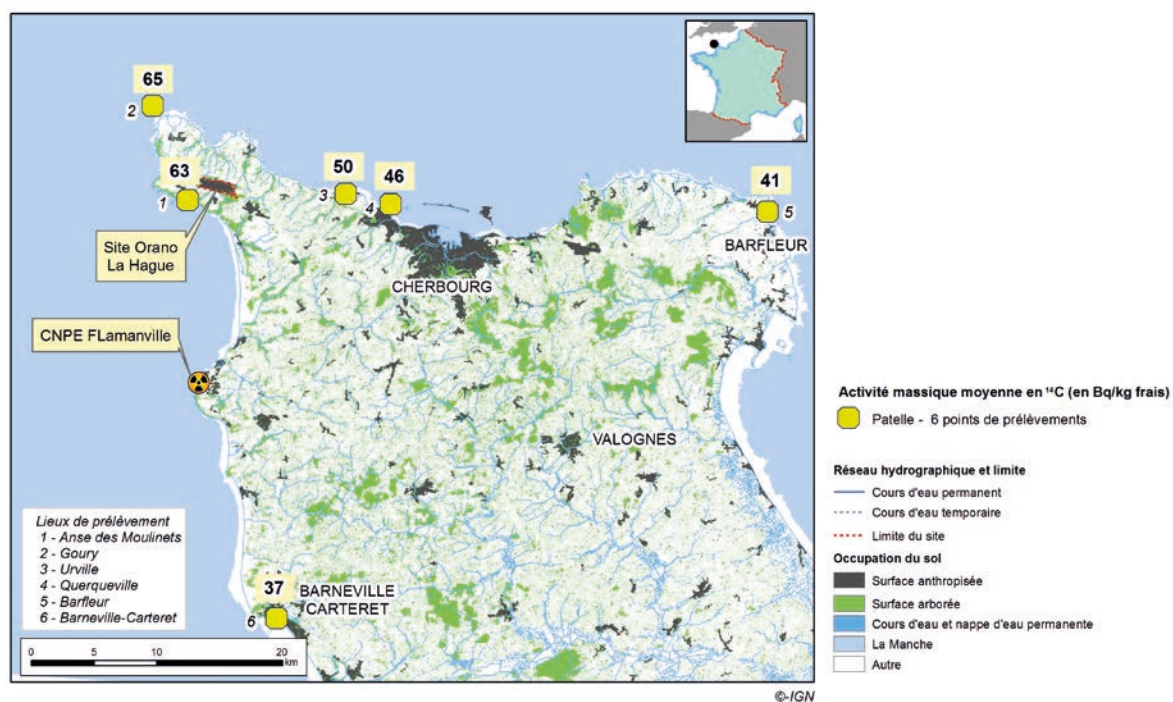


FIGURE 18 / ACTIVITÉS MOYENNES DU CARBONE-14 MESURÉES DANS LES PATELLES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE ENTRE 2018 ET 2020 (Bq/kg frais)



En milieu terrestre, les activités du carbone-14 autour de La Hague se distinguent également du bruit de fond de ce radionucléide (cf. chapitre 2), mais dans une moindre mesure. Dans le lait (figure 19), les activités volumiques mesurées dépassent rarement 40 Bq/L. Les moyennes calculées sur la période 2018-2020 sont restées du même ordre de grandeur que sur la période précédente, comprises entre 17 Bq/L à Jobourg (Hameau Ricard) et 30 Bq/L à Digulleville, dont la majeure partie est liée au bruit de fond (de l'ordre de 15 Bq/L).

Sur la période 2018-2020, les activités mesurées sur les échantillons d'herbes sont restées globalement du même ordre de grandeur que sur la période précédente. Des activités plus importantes ont toutefois pu être ponctuellement mesurées sur certains points de prélèvement (760 ± 60 Bq/kg sec à la ferme du Calais située au sud du site). On retrouve ainsi une répartition spatiale des activités (figure 20) cohérente avec la rose des vents (figure 21) et avec la distance entre le lieu de prélèvement et le site, ce qui permet de délimiter les zones d'influence des rejets atmosphériques de La Hague. Les vents dominants viennent majoritairement de l'ouest et du sud-ouest.

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

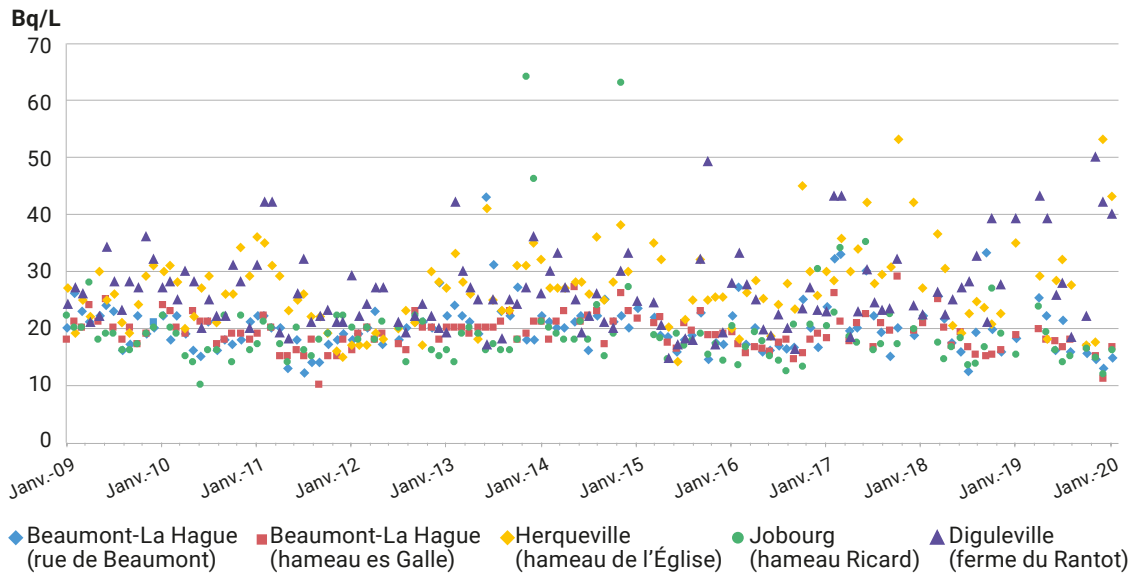


FIGURE 20 / ACTIVITÉS MASSIQUES DU CARBONE-14 DES HERBAGES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg sec)

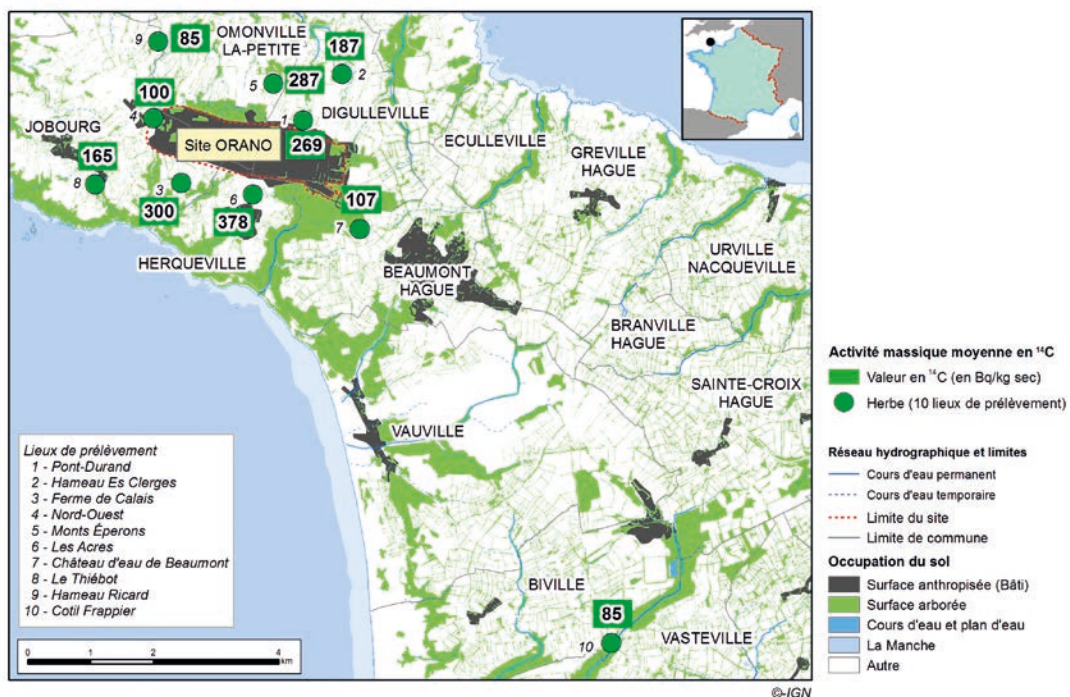
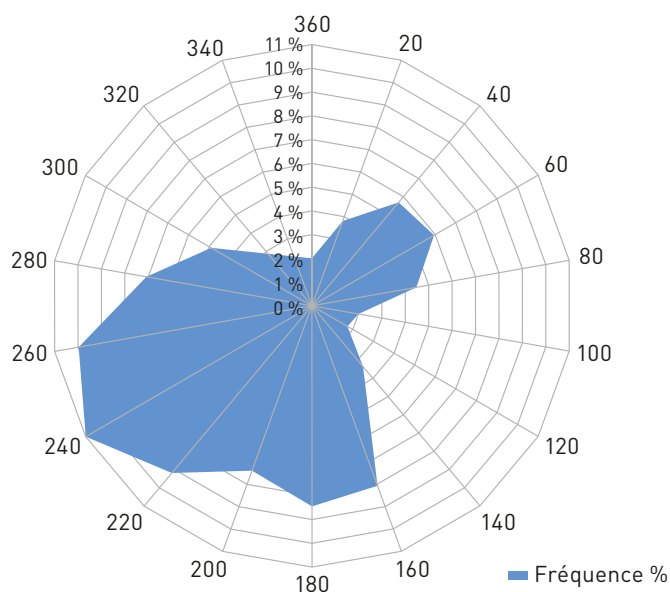


FIGURE 21 / ROSE DES VENTS (La Hague)



L'activité moyenne en carbone-14 mesurée dans les légumes feuilles et les légumes racines entre 2018 et 2020 est de 10 Bq/kg frais pour ces deux catégories (figure 22). Ces activités moyennes ont diminué d'un facteur 2 pour les légumes feuilles et d'un facteur 3 pour les légumes racines par rapport à la période 2015-2017 et sont aujourd'hui proches du bruit de fond (7 Bq/kg frais pour les légumes feuilles et 10 Bq/kg frais pour les légumes racines). Les teneurs en carbone-14 mesurées sur la période 2018-2020 dans les viandes (lapin et mouton) et dans les œufs (figure 23) ont également diminué et sont dans la gamme des valeurs observées en France. Pour les fruits (mûres), les activités massiques mesurées sont également proches du bruit de fond (14 Bq/kg frais) ; la valeur moyenne calculée sur la période étudiée est de 16 Bq/kg frais.

Les trois échantillons de miel prélevés entre 2018 et 2020 présentent une activité massique moyenne élevée de 79 Bq/kg frais. C'est le cas également du thym dont l'activité massique moyenne mesurée sur les trois échantillons est de 81 Bq/kg frais. 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 d'estimer que dans les légumes, les fruits et le lait produits dans les communes proches du site, l'activité de carbone-14 est de 400 Bq/kg de carbone, soit une activité de 175 Bq/kg de carbone, ajoutée au bruit de fond de 225 Bq/kg de carbone (cf. chapitre 2). À cette activité ajoutée de 175 Bq/kg de carbone correspond à une activité massique de + 5 Bq/kg frais pour les légumes feuilles, + 12 Bq/kg frais dans du lait de vache et + 16 Bq/kg frais dans les fruits. Il est à noter que l'activité de carbone-14 dans des céréales prélevées par l'IRSN en 2019 a été mesurée à 1 056 Bq/kg de carbone, ce qui correspond à un ajout de + 328 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 en carbone-14 à 450 Bq/kg de carbone, soit une activité massique ajoutée de 24 Bq/kg frais pour les poissons marins et de 21 Bq/kg frais pour les crustacés et les mollusques.

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

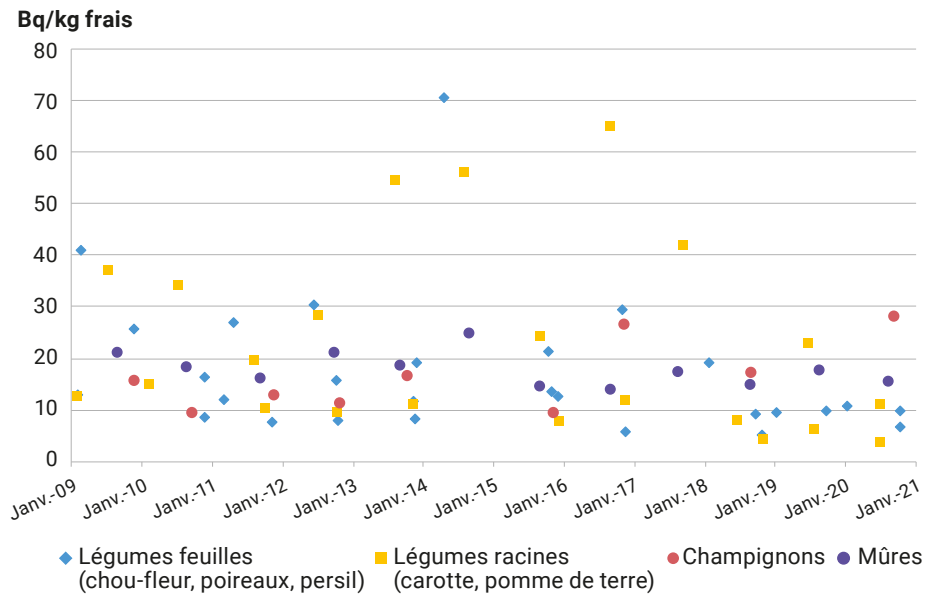
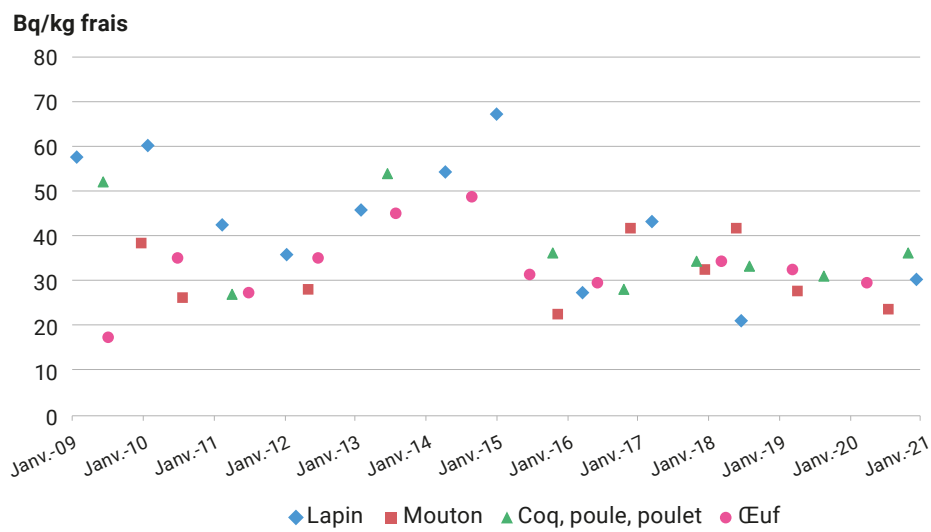


FIGURE 23 / ACTIVITÉS MASSIQUES DU CARBONE-14 MESURÉES DANS QUELQUES DENRÉES D'ORIGINE ANIMALES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais) DEPUIS JANVIER 2009



La dose potentiellement due à l'ingestion de denrées locales (lait, légumes, poisson, viande, miel, etc.) marquées en carbone-14 par les rejets de l'usine de La Hague est estimée à 0,66 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour un adulte se nourrissant d'aliments produits autour du site de La Hague sur la base des activités moyennes mesurées par l'IRSN durant la période d'observation (2018-2020). Le régime alimentaire retenu (tableau 5 du chapitre 9 relatif aux annexes) 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 Crédoc réalisée dans la région en 1998. Cette dose est supérieure d'environ un facteur 1,5 par rapport à celle estimée lors du *Bilan radiologique 2015-2017*. Cette légère augmentation est due à l'utilisation des résultats d'activités de carbone-14 exprimés en Bq/kg de carbone, que seuls les prélèvements réalisés par l'IRSN permettent d'obtenir et qui permet de prendre en compte toutes les composantes de la ration alimentaire.

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 en carbone-14 sur le ruisseau de la Sainte-Hélène ainsi que sur une douzaine de piézomètres répartis autour du site et dans son environnement.

Les activités mesurées dans les eaux de la Sainte Hélène aux points R6 (pont Durand) et R6-10 (hameau de la Fosse), confirment que l'activité en carbone-14 y est faible et aucune activité significative n'a été mise en évidence sur la période 2018-2020 (moyenne des SD mesurés sur la période de 1,75 Bq/L). L'Andra a en revanche mesuré des activités significatives en carbone-14 sur le piézomètre 131 en 2018 et 2020 (respectivement $2,8 \pm 2,1$ Bq/L et $3,7 \pm 2,1$ Bq/L) et sur le piézomètre 138 ($3,3 \pm 2,1$ Bq/L).

L'iode-129

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

Les rejets d'iode-129 par voie gazeuse (6,1 MBq en 2016) restent limités puisqu'ils sont préalablement absorbés dans des filtres à iode installés en amont des cheminées de rejet. En raison des seuils de décision utilisés par Orano pour sa surveillance de routine (de l'ordre de $0,008$ 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 d'une station de prélèvement d'aérosols dotée d'un débit plus grand que celle implantée auparavant à Beaumont-

Hague (80 m³/h) et d'une voie de prélèvement de l'iode gazeux sur cartouche à charbons actifs (cf. le focus du *Bilan radiologique 2015-2017*, pp. 141-144). Ce dispositif, ainsi que les moyens métrologiques plus performants mis en œuvre à des fins d'expertise, permettent de mesurer les activités en iode-129 dans l'atmosphère. Sur la période considérée, les activités volumiques mesurées dans l'air fluctuent entre moins de $0,5$ $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (SD) et 14 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour l'iode-129 mesuré sous forme particulaire et entre 10 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (SD) et 174 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour l'iode-129 mesuré sous forme gazeuse. L'iode-129 est donc principalement rejeté sous forme gazeuse et la moyenne calculée entre 2018 et 2020 à Omonville-la-Petite s'élève à 40 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour cette forme. Ce marquage très faible de l'air en iode-129 à Omonville-la-Petite génère pour la population une exposition interne par inhalation extrêmement faible (la dose efficace est estimée à $0,04$ $\mu\text{Sv}/\text{an}$).

Les activités massiques moyennes mesurées dans l'herbe, entre 2018 et 2020, sont comprises entre moins de $0,3$ (< SD) et $3,9$ Bq/kg sec (figure 24). Les activités moyennes calculées sur la période sont du même ordre de grandeur que pour la période précédente, voire légèrement inférieures. La répartition spatiale des activités en iode-129 de l'herbe reste similaire à celle du carbone-14 ou du tritium.

L'iode-129 dans les échantillons de lait prélevés par Orano dans les trois fermes situées sur les communes de Beaumont-Hague et Jobourg n'a été mesuré significativement qu'une seule fois sur la période 2018-2020 (pour un seuil de décision de l'ordre de $0,02$ Bq/L (figure 25). Par rapport à la période précédente, les détections de valeurs significatives ont en revanche été plus importantes dans les fermes situées au nord-est du site, à Digulleville (78 % des échantillons de lait) et au sud du site, à Herqueville (31 % des échantillons de lait). La moyenne des activités en iode-129 mesurées à Digulleville s'élève à $0,05$ Bq/L pour des activités comprises entre $0,02$ Bq/L et $0,13$ Bq/L. On constate d'ailleurs sur la figure 25 que les activités mesurées sur cette station ont été les plus importantes depuis 2009. Les niveaux d'activités mesurés dans le lait sont cohérents 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.

Aucune des analyses faites dans les choux, les carottes, les pommes de terre et les poireaux n'a permis de détecter l'iode-129 (SD < $0,1$ Bq/kg frais) et contrairement à la période précédente, il n'a pas non plus été mesuré dans les prélèvements de persil et de thym. Seuls les champignons continuent de présenter des valeurs significatives en iode-129 avec des valeurs comprises entre $0,05$ et $0,07$ Bq/kg frais sur la période 2018-2020.

FIGURE 24 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES DE L'IODE-129 DANS LES HERBAGES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg sec) ENTRE 2015 ET 2017

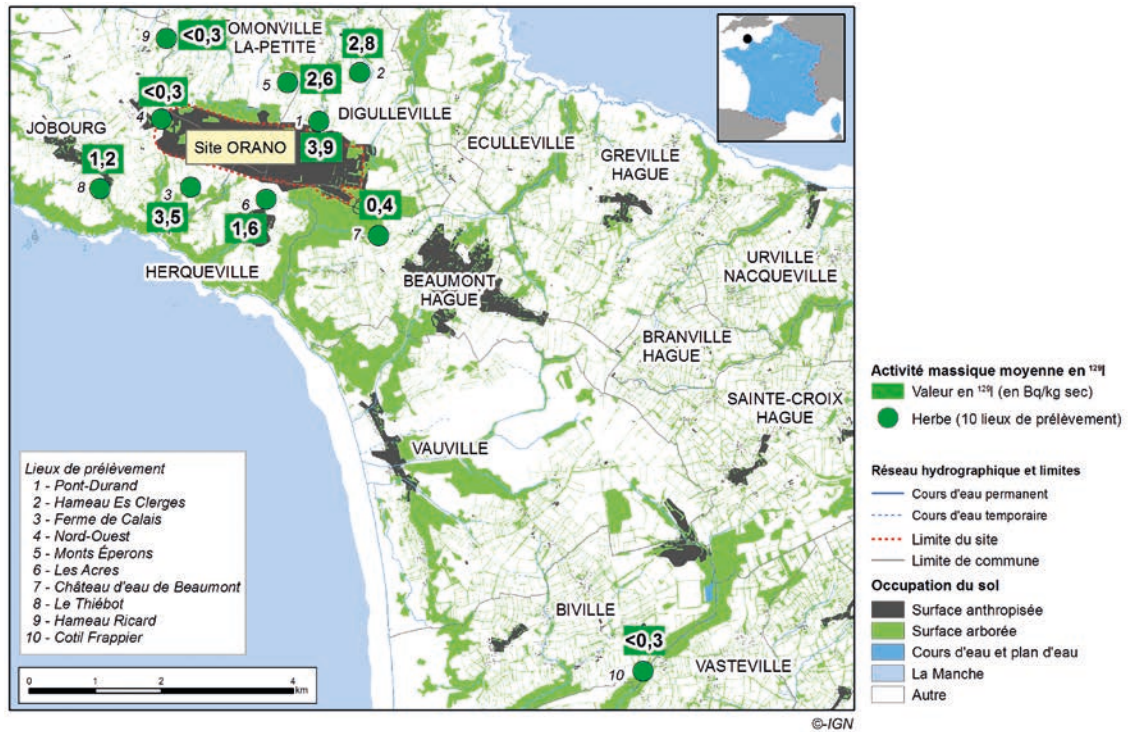
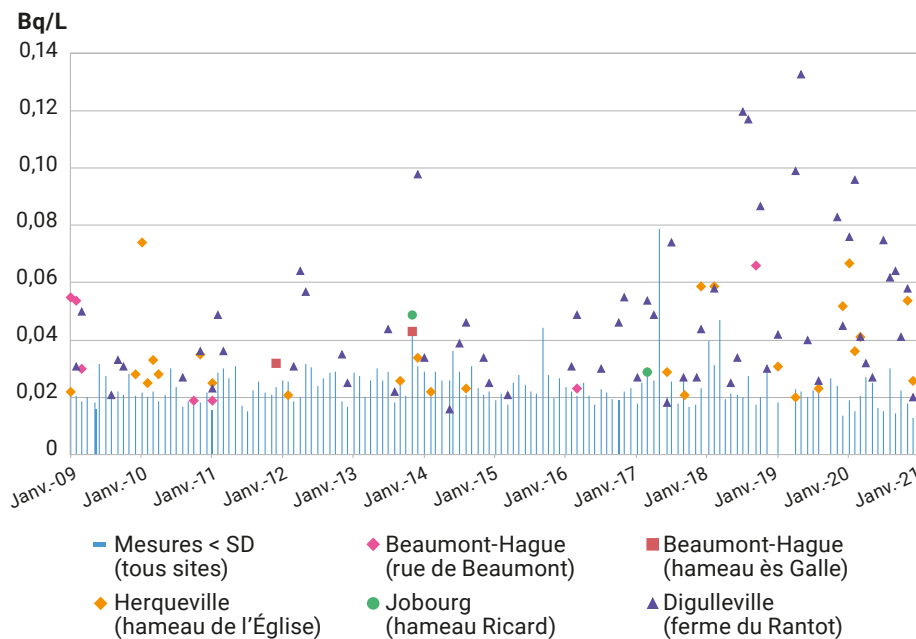


FIGURE 25 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DE L'IODE-129 MESURÉES DANS LE LAIT PRÉLEVÉ AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/L) DEPUIS 2009



L'absence d'activité quantifiable dans la viande (coq, lapin et mouton) pourrait résulter d'une faible part d'affouragement local. Par ailleurs, comme sur la période précédente, une valeur significative en iode-129 a été quantifiée dans l'échantillon d'œuf prélevé en 2018 (0,1 Bq/kg frais), denrée vers laquelle l'iode est fortement transféré. En 2019 et 2020, les activités étaient inférieures au seuil de décision (0,03 Bq/kg frais pour cette matrice).

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 (figure 26), les activités massiques les plus importantes étant mesurées dans la Sainte-Hélène (moyenne 2018-2020 de 24,5 Bq/kg sec). L'iode-129 n'est en revanche pas détecté dans l'eau, il peut être mis en évidence dans les sédiments et les activités les plus importantes sont mesurées au niveau de la Sainte-Hélène, où elles sont comprises entre 1,5 et 16,7 Bq/kg sec sur la période 2018-2020. On en mesure également sur le prélèvement réalisé au niveau de la retenue des Moulinets mais les concentrations mesurées dans ces cas restent proches du seuil de décision (et inférieures à 2 Bq/kg sec).

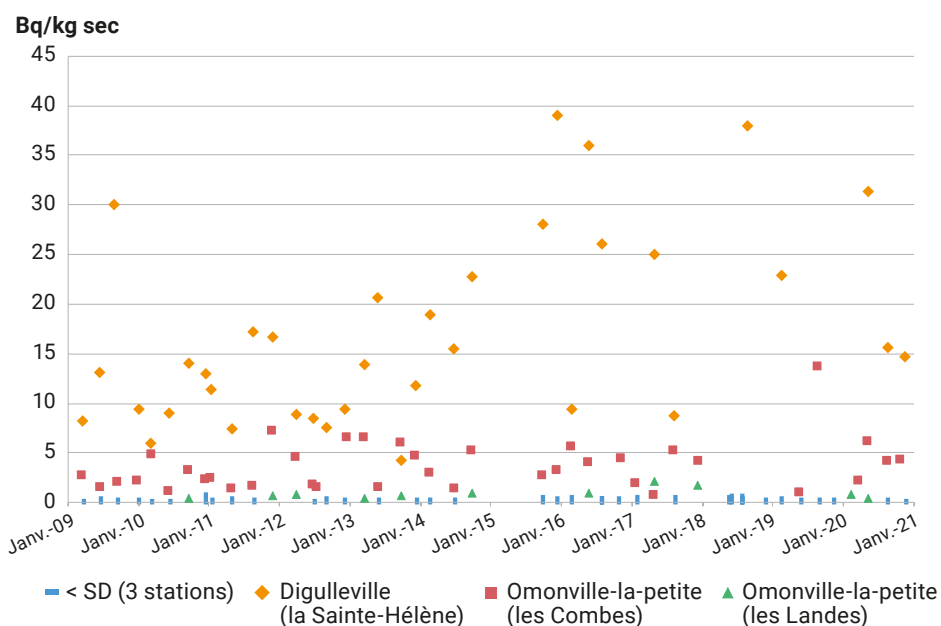
En milieu marin, les activités d'iode-129 les plus élevées sont mesurées dans les algues qui concentrent cet élément ; elles constituent ainsi un bio-indicateur pertinent de l'influence des rejets d'iode-129 de l'usine

de La Hague en zone éloignée. L'activité dans les algues peut ainsi dépasser ponctuellement la centaine de Bq/kg sec sur le prélèvement réalisé à Goury. Les patelles, qui se nourrissent des 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 mesurées, entre 2018 et 2020, dans les algues et les patelles prélevées sur les côtes du Cotentin. On peut constater que celle-ci est la même pour les deux matrices.

L'eau de mer est très peu marquée par l'iode-129 : pour la période 2018-2020, on ne le détecte qu'entre le 8 et le 28 juillet 2019, principalement au niveau du prélèvement réalisé quotidiennement dans l'anse des Moulinets mais également sur les trois prélèvements réalisés au large de Jobourg, du cap de La Hague et de la pointe de Jardeheu (anse Saint-Martin). Les activités mesurées varient entre 0,2 et 0,5 Bq/L.

À l'instar des activités en iode-129 mesurées dans les algues et les patelles, les denrées marines présentent un marquage plus important en iode-129 que les denrées d'origine terrestre. Les activités sont plus marquées dans les crustacés et mollusques que dans les poissons (figures 29 et 30). En effet, sur la période 2018-2020, les activités massiques mesurées dans les poissons vont de 0,05 Bq/kg frais sur la côte est (< SD) à 0,27 Bq/kg frais sur la côte ouest de la Manche alors que pour les crustacés, les activités mesurées

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



dans les homards pêchés sur la côte ouest sont comprises entre 0,18 et 1,97 Bq/kg frais. Les tourteaux présentent également un marquage assez régulier avec des activités massiques comprises entre 0,06 et 0,3 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 27). L'activité massique moyenne de l'iode-129 calculée pour les crustacés et les mollusques toutes espèces confondues est la même sur la période 2018-2020 (0,3 Bq/kg frais). Elle a légèrement baissé pour les mollusques par rapport à la période précédente (0,5 Bq/kg frais).

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 0,31 µSv/an. Cette dose a été évaluée pour un adulte, en considérant exclusivement les denrées marines du régime alimentaire retenu (tableau 5 du chapitre 9 d'annexes, population vivant dans le nord Cotentin et dont le chef de famille est pêcheur), étant donné que presque toutes les denrées terrestres ne présentent pas de valeurs significatives suffisamment nombreuses pour calculer une valeur moyenne. Cette dose est supérieure d'un facteur 4 par rapport à celle calculée dans le bilan radiologique 2015-2017, du fait des activités mesurées dans le lait de vache et dans les poissons. Cette dose est néanmoins inférieure à celle évaluée par Orano à partir des rejets de 2019 : 0,49 µSv/an pour un adulte résidant dans le canton de Digulleville et 0,86 µSv/an pour un adulte résidant dans le canton de Goury.

Les plutonium-238, 239 et 240 et l'américium-241

Compte tenu des niveaux d'activité rejetée, l'influence des rejets d'actinides par l'établissement de La Hague sur le milieu 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 en milieu aquatique continental. On observe cependant un marquage des sédiments prélevés dans le ruisseau de Sainte-Hélène, le ru des Landes au niveau de la résurgence formant sa source et le bassin des Moulinets ; ce marquage est lié à des événements anciens survenus sur les sites de La Hague et du CSM. Les niveaux observés sont de l'ordre de 0,6 à 22 Bq/kg sec en américium-241 pour la source du ruisseau des Landes, de 0,15 à 0,2 Bq/kg sec en plutonium-238 et de 0,26 à 0,38 Bq/kg sec en plutonium-238 et 239 dans la Sainte-Hélène. En revanche, contrairement à la période 2015-2017, aucun actinide n'a été détecté dans les eaux de la Sainte-Hélène.

L'influence des rejets liquides en milieu marin est en revanche plus marquée. Les isotopes du plutonium sont ainsi régulièrement mesurés dans les matrices les plus sensibles que sont les mollusques (figures 31 et 32). Entre 2018 et 2020, les mesures réalisées sur les coquilles Saint-Jacques pêchées sur la côte nord du Cotentin présentent des activités massiques significatives de l'ordre de 0,011 Bq/kg frais pour le plutonium-238 et de 0,035 Bq/kg frais pour le plutonium 239+240. Ces résultats sont du même

FIGURE 27 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE L'IODE-129 MESURÉES DANS LES ALGUES SUR LA PÉRIODE 2015-2020 (Bq/kg sec)

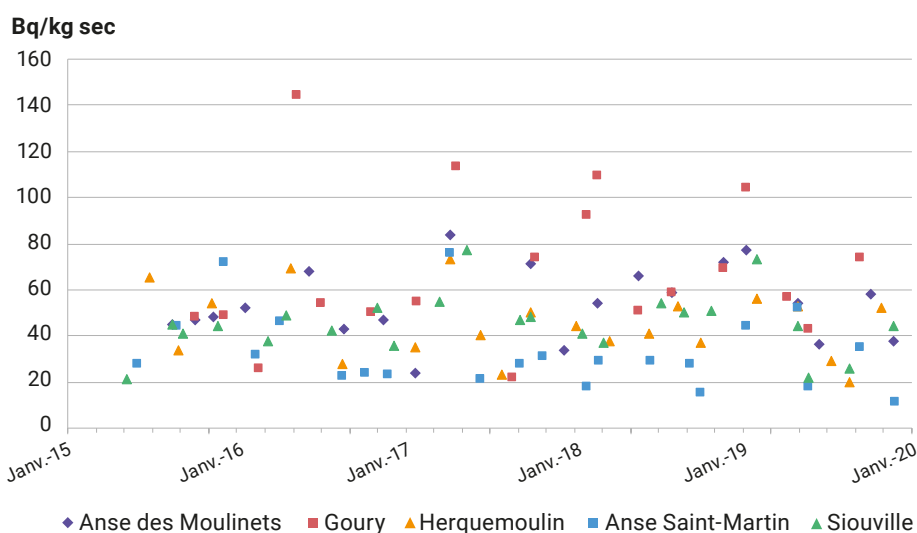
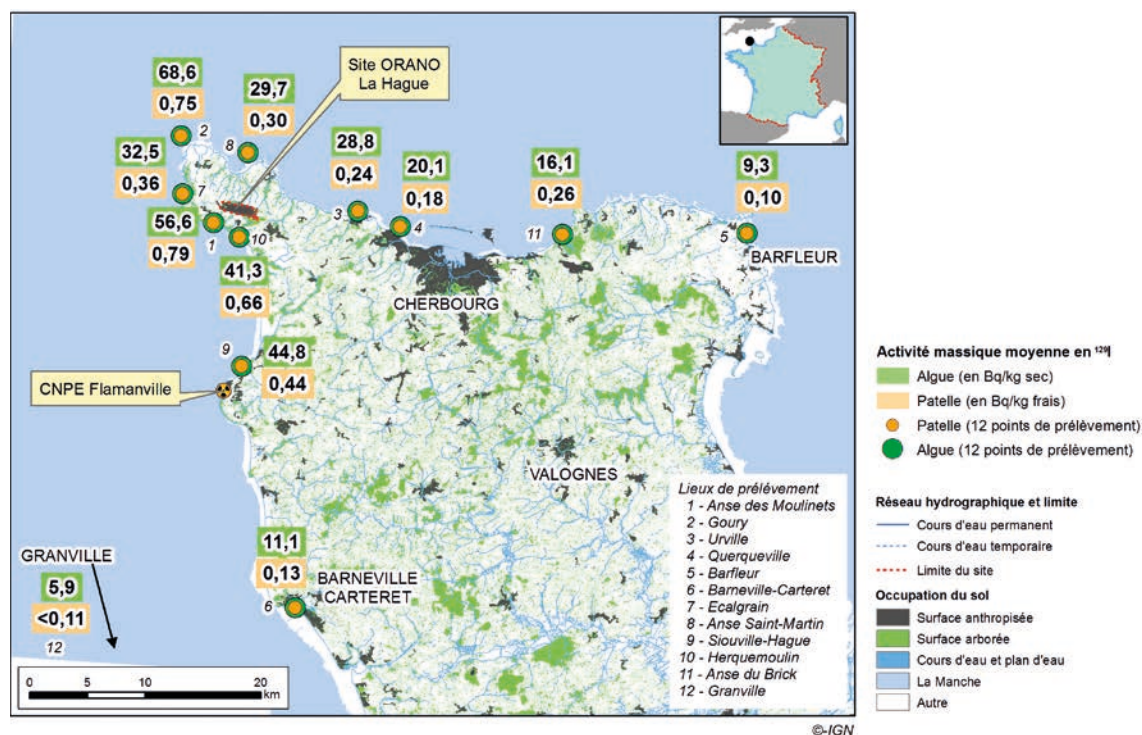


FIGURE 28 / ACTIVITÉS MOYENNES EN IODE-129 DES ALGUES ET DES PATELLES SUR LA PÉRIODE 2018-2020 POUR LES DOUZE STATIONS DE PRÉLÈVEMENTS



ordre de grandeur que les activités observées entre 2015 et 2017 pour le plutonium-238 et sont supérieurs d'un facteur 3 pour le plutonium 239+240.

Pour les huîtres prélevées sur les côtes est et ouest du Cotentin, plus de 50 % des valeurs d'activités mesurées sont inférieures au seuil de décision pour la mesure du plutonium 239+240 (< 0,005 Bq/kg frais). L'activité massique maximale mesurée est de 0,011 Bq/kg frais. Pour le plutonium-238, tous les résultats de mesures dans les huîtres sont inférieurs au seuil de décision entre 2018 et 2020 (<0,004 Bq/kg frais). Enfin, pour les patelles, environ 50 % des valeurs de plutonium-238 sont significatives, tous lieux de prélèvement confondus. Pour la mesure du plutonium 239+240, la plupart des points de surveillance présentent plus de 80 % de valeurs significatives (supérieures aux seuils de décision). Les activités massiques moyennes calculées pour la période 2018-2020 sont présentées sur la figure 33. L'étendue spatiale du marquage des patelles par les actinides est moins importante qu'avec l'iode-129.

S'agissant des crustacés, les détections d'actinides sont rares (de l'ordre de 5 %). Un marquage en octobre 2018 en plutonium-238 (0,013 Bq/kg frais) et un marquage en juillet 2019 en plutonium 239+240 (0,029 Bq/kg frais) ont été détectés dans des homards prélevés sur la côte ouest du Cotentin. En novembre 2019, une mesure significative en plutonium 239+240 (0,0048 Bq/kg frais) a été relevée sur des tourteaux prélevés sur la côte nord du Cotentin.

Entre 2018 et 2020, les valeurs de plutonium 239+240 et de plutonium-238 mesurées dans les poissons sont inférieures au seuil de décision (< 0,0025 Bq/kg frais), à l'exception d'un échantillon prélevé sur la côte est, en juillet 2019, présentant une activité massique mesurée de 0,0021 Bq/kg frais de plutonium 239+240 et un échantillon de poissons prélevés sur la côte ouest du Cotentin, en juillet 2019, présentant une activité massique de 0,0044 Bq/kg frais en plutonium-238.

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

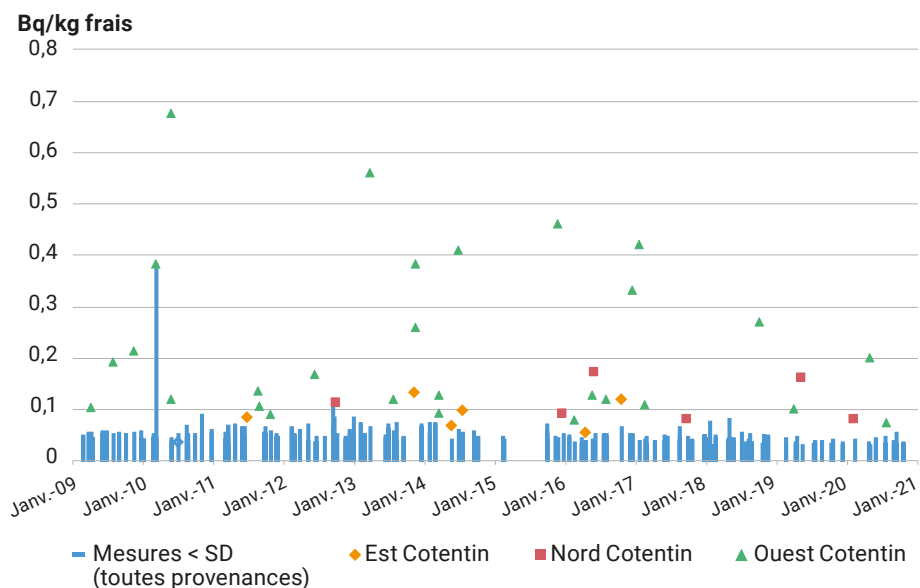


FIGURE 30 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE L'IODE-129 MESURÉES DANS LES CRUSTACÉS ET LES MOLLUSQUES (hors patelles) PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

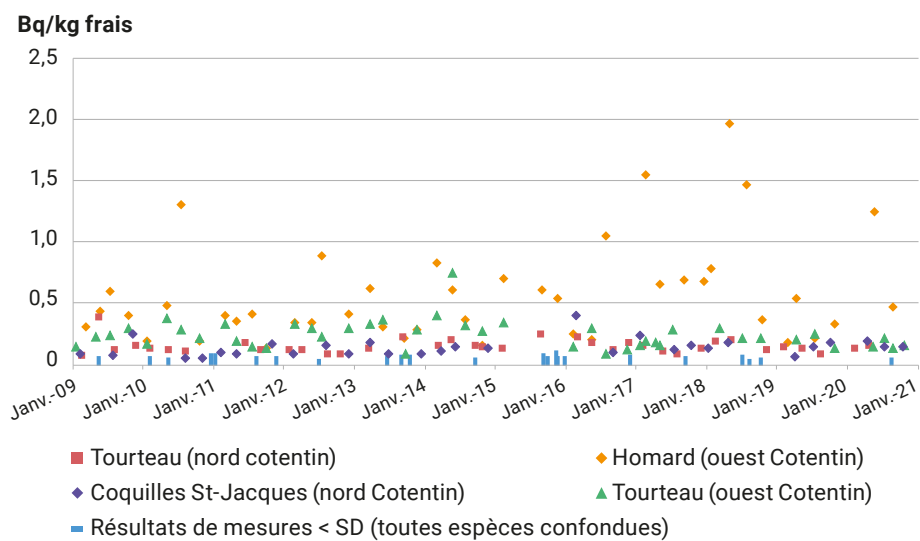


FIGURE 31 / ACTIVITÉS MASSIQUES DU PLUTONIUM 239+240 DANS LES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

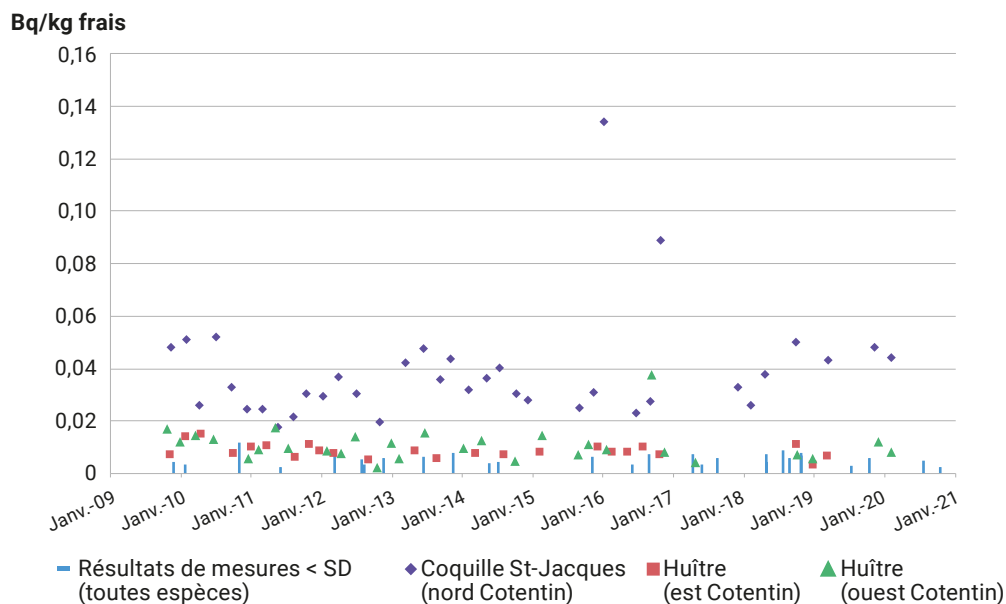


FIGURE 32 / ACTIVITÉS MASSIQUES DU PLUTONIUM-238 DANS LES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)

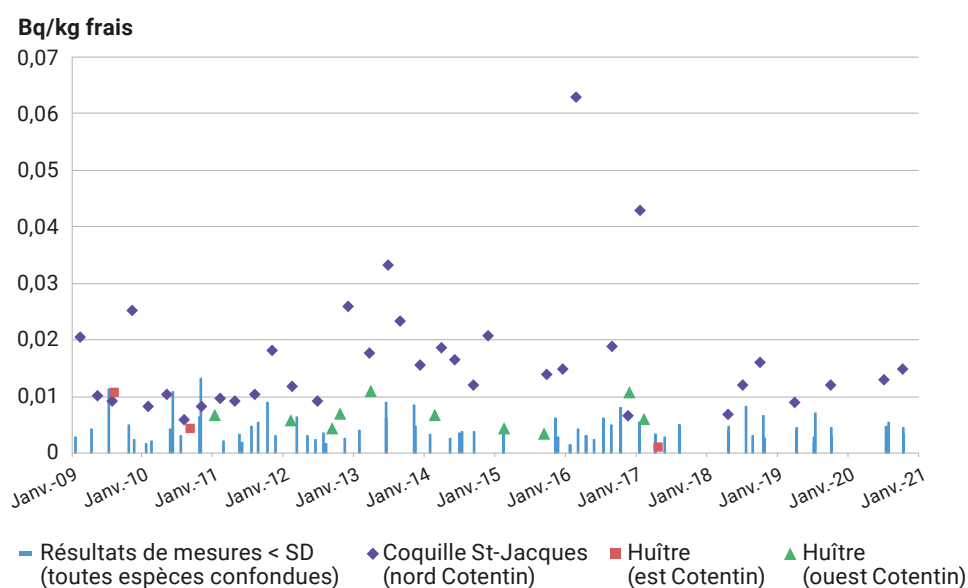
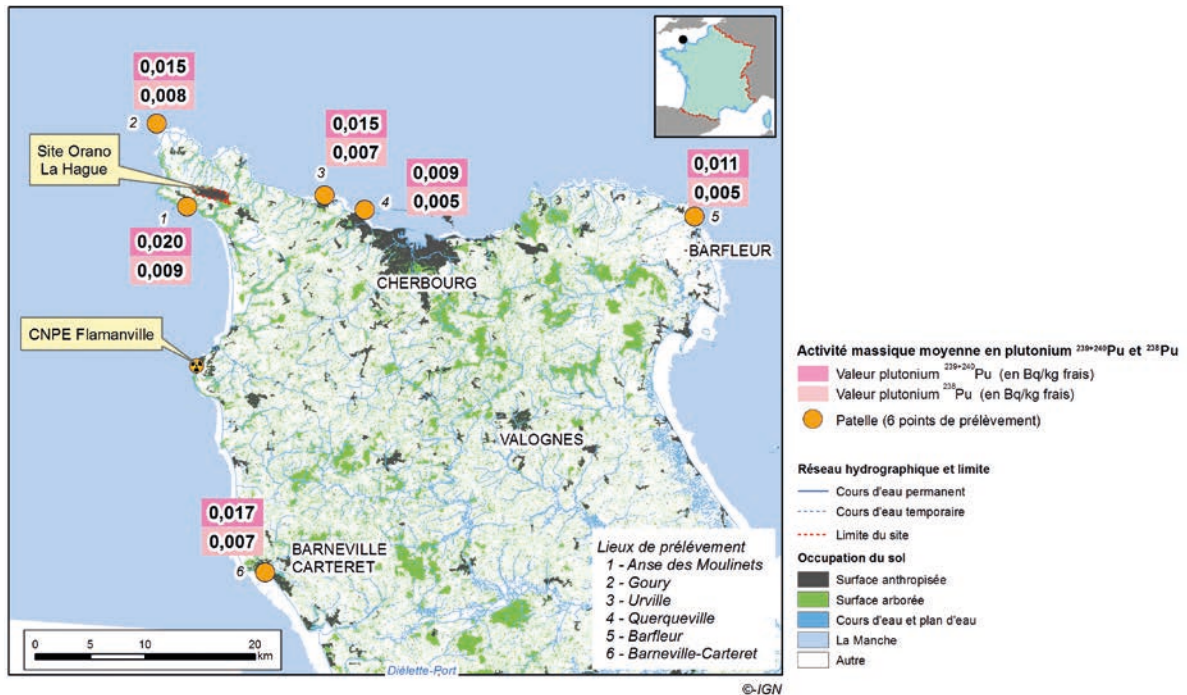


FIGURE 33 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES DU PLUTONIUM-239+240 ET DU PLUTONIUM-238 MESURÉES DANS LES PATELLES PRÉLEVÉES AUTOUR DE LA HAGUE (Bq/kg frais)



L'américium-241 a pu être mesuré sur un échantillon de coquille Saint-Jacques en 2017 (0,19 Bq/kg frais) et sur un échantillon de patelles, à Granville, en 2016 (0,09 Bq/kg frais).

La dose potentiellement due à l'ingestion de denrées locales marquées par les isotopes du plutonium (238, 239 et 240) rejetés par l'usine de La Hague est estimée à 0,03 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. 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 supérieure d'un facteur 3 par rapport à celle mesurée dans le *Bilan radiologique 2015-2017* en accord avec les niveaux plus élevés observés pour le plutonium 239+240.

Enfin, l'influence des rejets liquides de plutonium de La Hague est également décelable dans les sédiments et les algues. Dans les sédiments marins et sur cette même période (tableau 3), les activités massiques moyennes mesurées vont de 0,32 Bq/kg sec à Barfleur à 0,80 Bq/kg sec dans l'anse Saint-Martin pour le plutonium 239+240 et de 0,10 Bq/kg sec à Barfleur à 0,38 Bq/kg sec dans la grande rade de Cherbourg pour le plutonium-238.

L'américium-241 est quantifié dans pratiquement tous les sédiments marins prélevés sur la période 2018-2020. L'activité massique moyenne maximale mesurée est de 1,93 Bq/kg sec dans la grande rade de Cherbourg. Ponctuellement, le curium-244 est également mesuré dans les sédiments (20 % de valeurs supérieures au seuil de décision). L'activité maximale mesurée est de 0,24 Bq/kg sec à l'anse Saint-Martin. Les échantillons présentant les valeurs les plus élevées proviennent de la grande rade de Cherbourg ; ceci s'explique par une plus grande finesse des sédiments, qui permet une plus grande fixation des radionucléides. 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 0,43, 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 2018 et 2020 pour ces radionucléides sont dans les gammes de valeurs observées pour la période 2015-2017.

Dans les algues, les activités mesurées sur la période de 2018 à 2020 vont de 0,037 (< SD) à 0,37 Bq/kg sec pour le plutonium 239+240 et de 0,014 (< SD) à 0,24 Bq/kg sec pour le plutonium-238.

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

Lieu de prélèvement	Activités massiques moyennes (Bq/kg sec)		
	²³⁸ Pu	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am
Anse des Moulinets	0,18	0,39	0,70
Baie d'Écalgrain	0,19	0,34	0,84
Anse St-Martin	0,35	0,80	1,66
Grande rade de Cherbourg	0,38	0,79	1,93
Plage de Sciottot	0,13	0,33	0,53
Anse du Brick	0,29	0,75	1,63
Barfleur	0,10	0,32	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⁽³⁾.

Depuis la baisse des rejets liquides de certains radionucléides (à partir de 2007), la plupart de ces radionucléides n'est quasiment plus décelée dans le cadre de la surveillance effectuée par Orano.

Ruthénium-106

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 2018, il n'est détecté que dans environ 10 % des patelles prélevées et l'activité massique maximale mesurée est de 2,3 Bq/kg frais. Il a également été détecté dans un échantillon de coquilles Saint-Jacques prélevé sur la Côte nord du Cotentin en 2020 (0,7 Bq/kg frais), valeur proche du seuil de décision (<0,5 Bq/kg frais), et dans environ 10 % des prélèvements d'algues pour une activité maximale de 5,3 Bq/kg sec.

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 détecté qu'une fois sur la période 2018-2020 dans un échantillon de patelles prélevées dans l'anse des Moulinets (activité massique de 0,14 Bq/kg frais).

Les études réalisées par l'IRSN, à la demande d'EDF, montrent que la fréquence de détection du cobalt-60 dans les denrées marines a été réduite sur les côtes de Normandie (tableau 4).

Le cobalt-60 est encore régulièrement mesuré dans les sédiments prélevés autour de la rade de Cherbourg (avec une activité maximale observée de 1,68 Bq/kg sec) et de l'anse Saint-Martin (avec une activité maximale mesurée de 1,81 Bq/kg sec). Ce niveau décroît lorsqu'on s'en éloigne vers la côte est du Cotentin avec une activité massique moyenne de 0,3 Bq/kg sec à l'anse du Brick et des activités massiques inférieures au seuil de décision à Barfleur. Le cobalt-60 n'est pas détecté dans les sédiments marins de la côte ouest du Cotentin sur la période 2018-2020.

Enfin, les niveaux d'activité mesurés sur les différents points de prélèvement vont de 0,18 (< SD) à 1,24 Bq/kg sec dans les algues.

(3) Les activités de ruthénium-106 sont imputables aux rejets de La Hague car les CNPE ne rejettent pas ce radionucléide ; les activités de cobalt-60 et de césium-137 sont majoritairement imputables aux rejets de La Hague plus de 1 000 à 10 000 fois plus élevés que ceux des CNPE. Aujourd'hui cet écart est plus faible.

TABLEAU 4 / ACTIVITÉS MASSIQUES DU COBALT-60 ET DU RUTHENIUM-106 MESURÉES DANS DES MOLLUSQUES PRÉLEVÉS EN MANCHE ET ANALYSÉS DANS LE CADRE DES ÉTUDES CONFIIÉES À L'IRSN PAR EDF AUTOUR DES CNPE (Bq/kg frais)

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

CNPE EDF		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Flamanville	⁶⁰ Co	0,06-0,09 (4/4)	0,05 (1/5)	0,03-0,06 (4/5)	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)
	¹⁰⁶ Ru	0,26-0,44 (3/4)	0,25 (1/5)	0,18-0,27 (2/5)	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)	-
Paluel	⁶⁰ Co	0,02-0,03 (2/4)	-	0,03 (1/4)	0,02 (1/4)	0,02-0,07 (3/4)	0,04 (1/4)	-	-	0,01 (2/3)	-
	¹⁰⁶ Ru	-	-	-	-	-	-	-	-	0,10-0,16 (2/3)	-
Penly	⁶⁰ Co	0,02 (2/5)	0,01-0,02 (3/8)	0,03 (1/4)	-	0,012 (1/4)	0,013 (1/4)	0,021 (1/4)	0,01 (1/2)	-	-
	¹⁰⁶ Ru	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gravelines	⁶⁰ Co	0,02-0,03 (2/3)	0,05 (1/2)	-	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)
	¹⁰⁶ Ru	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04 (1/2)	-

Césium-137

En milieu 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 mesurées dans cette zone sont supérieures à la valeur du bruit de fond pour ce radionucléide dû aux retombées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl. L'origine de ce marquage pourrait être liée à un apport de césium-137 par voie aérienne suite à des événements anciens (bloc de béton avec un défaut d'étanchéité contenant des déchets entreposés sur la zone nord-ouest avec dissémination de césium par lixiviation mis en évidence en 1974, incendie du silo 130 en 1981).

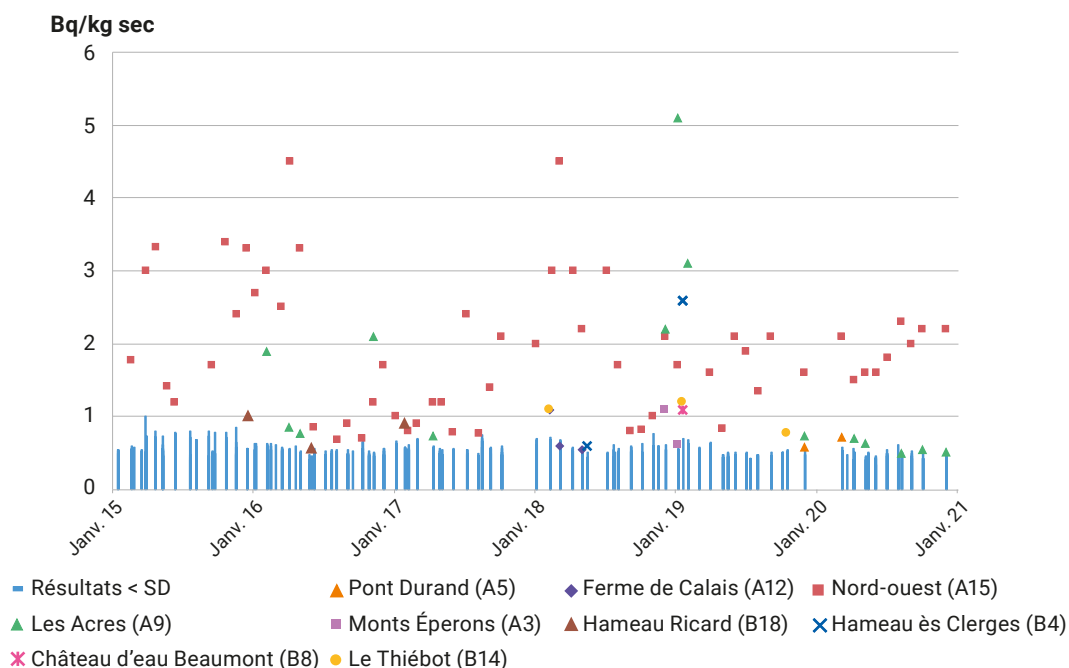
Ce marquage est également décelable dans une moindre mesure à travers les points de surveillance réguliers qui sont faits par Orano dans l'herbe au nord-ouest du site (figure 34) : principalement le point de surveillance A15, à proximité de la résurgence du ruisseau des Landes, ainsi qu'en s'éloignant vers le nord au point A6, aux Acres. Les échantillons d'herbes prélevés à ces deux points présentent régulièrement des valeurs d'activité massique 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 2018-2020, des valeurs significatives d'activités massiques de césium-137 ont été mesurées au hameau Thiébot, au pont Durand, au mont Éperons et au château d'eau de Beaumont-Hague. Contrairement à la période 2015-2017, les activités en césium-137 au point de prélèvement du hameau Ricard sont toutes sous le seuil de décision.

Ces niveaux mesurés dans l'herbe sont toutefois suffisamment faibles pour qu'il n'y ait pas de transfert quantifiable au lait de vache, comme pour la période 2015-2017. En effet, tous les résultats pour ce type de matrice sont inférieurs au seuil de décision (< 0,04 Bq/L).

Concernant les denrées, les valeurs des activités massiques mesurées sont pratiquement toutes sous les seuils de décision à l'exception des prélèvements de champignons et d'un prélèvement de carottes. S'agissant des champignons, l'activité massique moyenne mesurée entre 2018 et 2020 est de 0,57 Bq/kg frais. S'agissant de l'échantillon de carottes prélevées sur la commune de Beaumont-Hague, une activité massique de 0,034 Bq/kg frais a été mesurée en 2019. Ces mesures sont dans les gammes de bruit de fond observées pour ces denrées.

FIGURE 34 / ACTIVITÉS MASSIQUES DU CÉSIIUM-137 DANS LES HERBAGES PRÉLEVÉS AUTOUR DE LA HAGUE ENTRE 2018 ET 2020 (Bq/kg sec)



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 en césium-137 qui sont relativement stables (figure 35). Les activités mesurées entre 2018 et 2020 sont comprises entre 0,04 et 0,25 Bq/kg frais, avec une valeur moyenne de 0,11 Bq/kg frais. Ces résultats sont proches du bruit de fond pour ce radionucléide dans les poissons marins (0,08 Bq/kg frais). En 2019 et en 2020, des activités massiques de l'ordre de 0,1 Bq/kg frais ont également été sporadiquement mesurées.

Sur la base des activités en césium-137 mesurées dans les poissons, les patelles, les champignons et les carottes, la dose reçue par une personne qui consommerait régulièrement ces denrées provenant des environs du site de La Hague et selon le scénario retenu est de l'ordre de 0,012 μ Sv/an.

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.

En milieu aquatique continental, les activités volumiques du strontium-90 mesurées 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 0,69 et 1,4 Bq/L (figure 36) entre 2018 et 2020. Les niveaux d'activités volumiques au niveau de la source du ruisseau des Landes sont globalement du même ordre de grandeur que lors de la période 2015-2017 (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 source du ruisseau des Landes est réalisé au même endroit que celui de l'IRSN. Les activités mesurées en strontium-90 à ces points de surveillance sont de l'ordre de 0,15 Bq/L.

Ces concentrations sont à mettre en relation avec le marquage en strontium-90 de la nappe phréatique alimentant ce ruisseau suite à un incident ayant eu lieu dans les années 1980, au cours duquel des fosses

FIGURE 35 / ACTIVITÉS MASSIQUES DU CÉSIIUM-137 DANS LES POISSONS PRÉLEVÉS DANS LA MANCHE AUTOUR DE LA HAGUE ENTRE 2018 ET 2020 (Bq/kg frais)

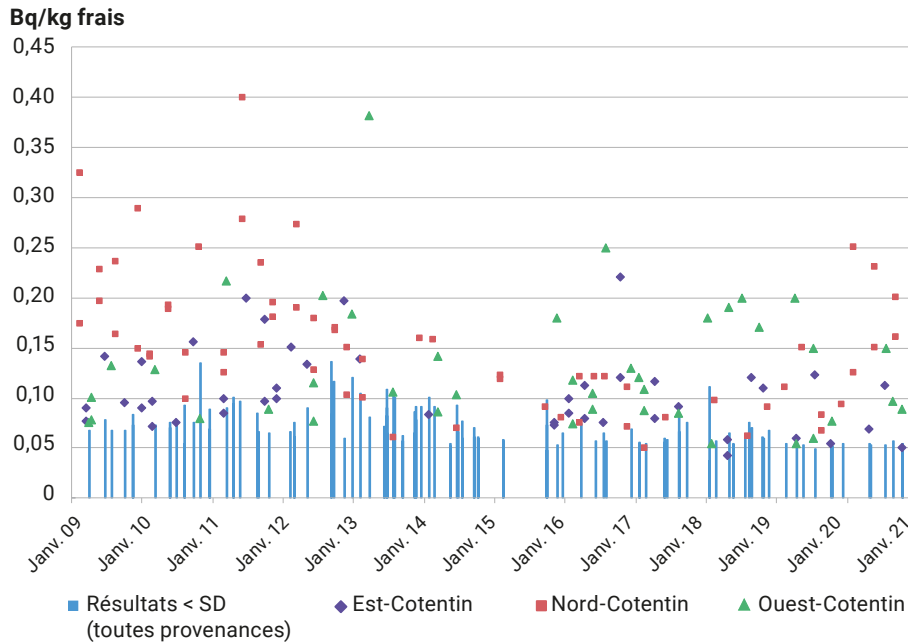
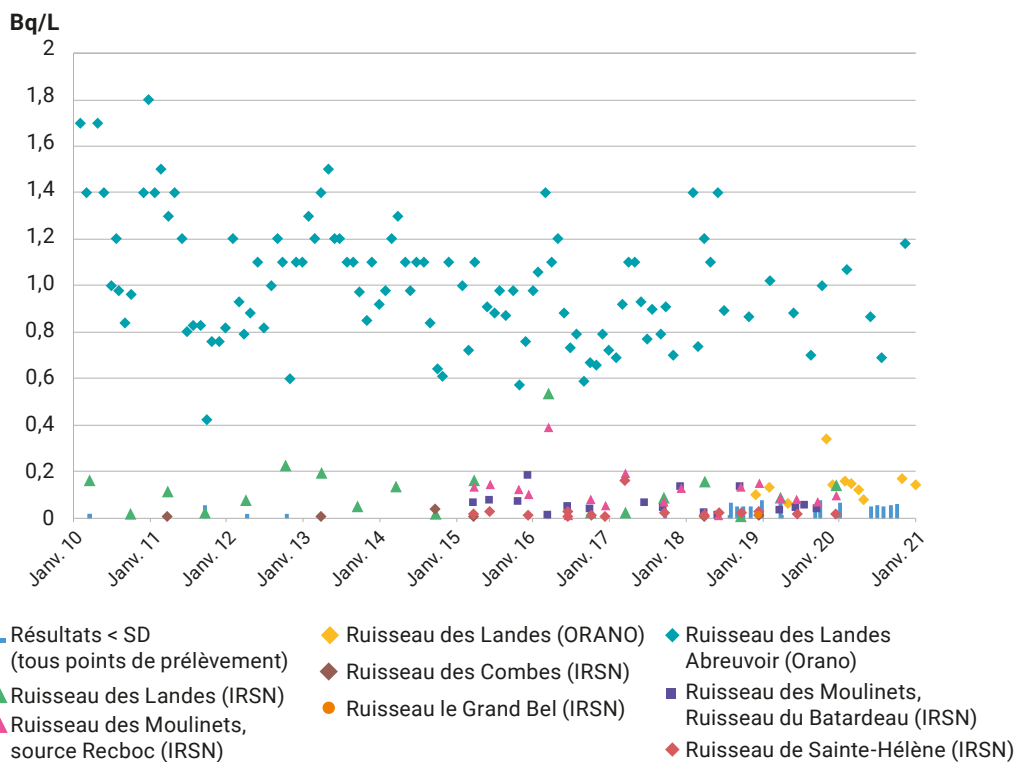


FIGURE 36 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU STRONTIUM-90 DANS LES RUISSEAUX AUTOUR DE LA HAGUE (données IRSN) (Bq/L)



bétonnées où étaient entreposés des déchets en surface se sont dégradées et ont perdu leur étanchéité. Ces déchets ont depuis été repris.

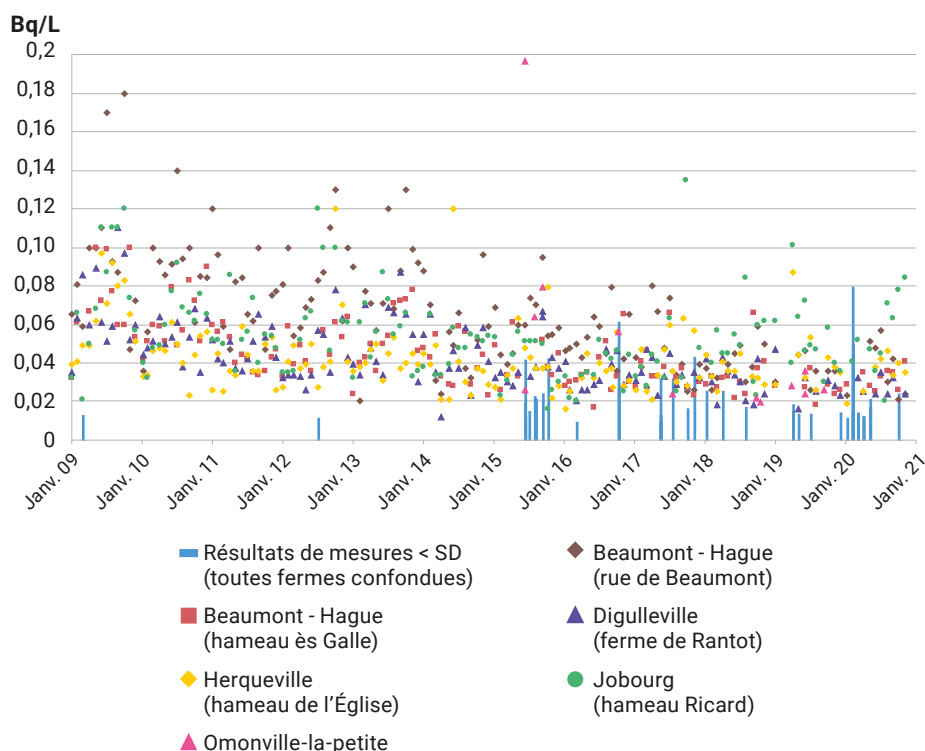
Dans le lait de vache prélevé dans les cinq fermes situées sur les communes de Beaumont-Hague, Digulleville, Herqueville et Jobourg, environ 90 % des valeurs sont significatives⁽⁴⁾ (figure 37). La ferme située à Jobourg présente l'activité volumique moyenne la plus élevée sur la période de 2018 à 2020 (0,06 Bq/L). Les autres fermes présentent un marquage en strontium-90 proche du bruit de fond local pour ce radionucléide (0,036 Bq/L) ; les activités volumiques moyennes sont comprises entre 0,029 et 0,038 Bq/L.

Dans les autres denrées prélevées, les mesures en strontium-90 ne dépassent pas les seuils de décision dans les prélèvements de pommes de terre et de lapins de garenne. En revanche, le strontium-90 présente une activité massique moyenne de 0,277 Bq/kg sec dans les grains de blé de la commune de Digulleville.

La dose reçue par une personne qui consommerait le lait de vache et les produits laitiers provenant de la commune de Jobourg, selon le scénario retenu, est de 0,05 µSv/an. Cette dose est inférieure à 0,001 µSv/an dans le cas où la valeur moyenne de l'activité volumique calculée à partir de l'ensemble des échantillons de lait provenant des fermes situées autour du site est retenue⁽⁵⁾.

La dose reçue par une personne qui consommerait du blé provenant de la commune de Digulleville, selon le scénario retenu, est inférieure à 0,001 µSv/an.

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



(4) La notion de « valeur significative » implique ici une valeur mesurée supérieure au seuil de décision (SD).

(5) La ration annuelle de laitage et produits laitiers consommés localement selon le scénario retenu est de 10,2 kg/an et de 8 L/an de lait.

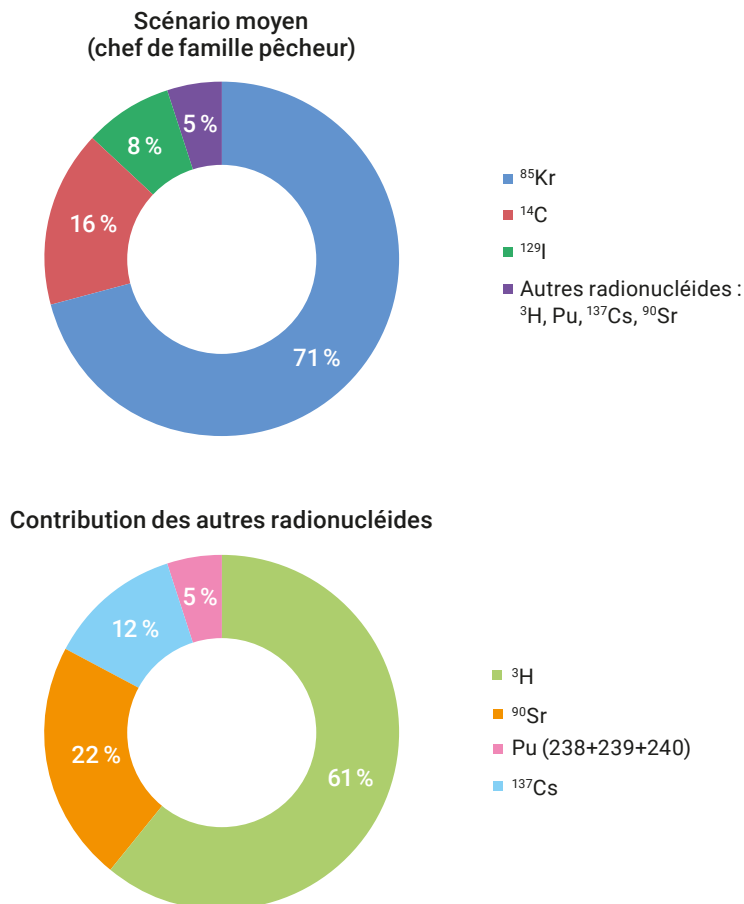
Synthèse de l'évaluation des doses

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 à La Hague par voie liquide et gazeuse, 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, la dose efficace totale reçue serait de 4,3 μ Sv/an. La contribution du krypton-85 à cette dose efficace totale serait d'environ 71 % de par l'exposition externe qu'il occasionne. Les contributeurs secondaires seraient le carbone-14 (16 %) 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 et 240) et enfin par le césium-137.

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.

Le scénario retenu pour évaluer les doses reçues par la population, dans le cadre du *Bilan radiologique 2018-2020*, tend à être représentatif d'un régime alimentaire moyen pour une population vivant dans le nord Cotentin. Afin de disposer d'évaluations de doses plus pénalisantes, deux régimes alimentaires ont été proposés en 1999 dans le cadre de l'étude faite par le Groupe radioécologique 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 des produits de la mer pour les pêcheurs, ou des 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).

Les doses calculées selon ces trois scénarios sont comprises entre 4,3 µSv/an selon le scénario retenu pour le bilan radiologique et 9,8 µSv/an pour un agriculteur de Digulleville. Pour ce dernier, l'exposition externe au krypton-85 constitue la voie principale d'exposition (≈ 44 %) alors que la contribution de carbone-14 à la dose due à l'ingestion de denrées locales est de 37 %. Pour un pêcheur habitant à Jobourg, la dose efficace totale est estimée à 7,6 µSv/an. À noter que pour ce pêcheur, le carbone-14 (36 %) et l'iode-129 (35 %) sont les contributeurs principaux pour la dose du fait des quantités ingérées en denrées marines locales.

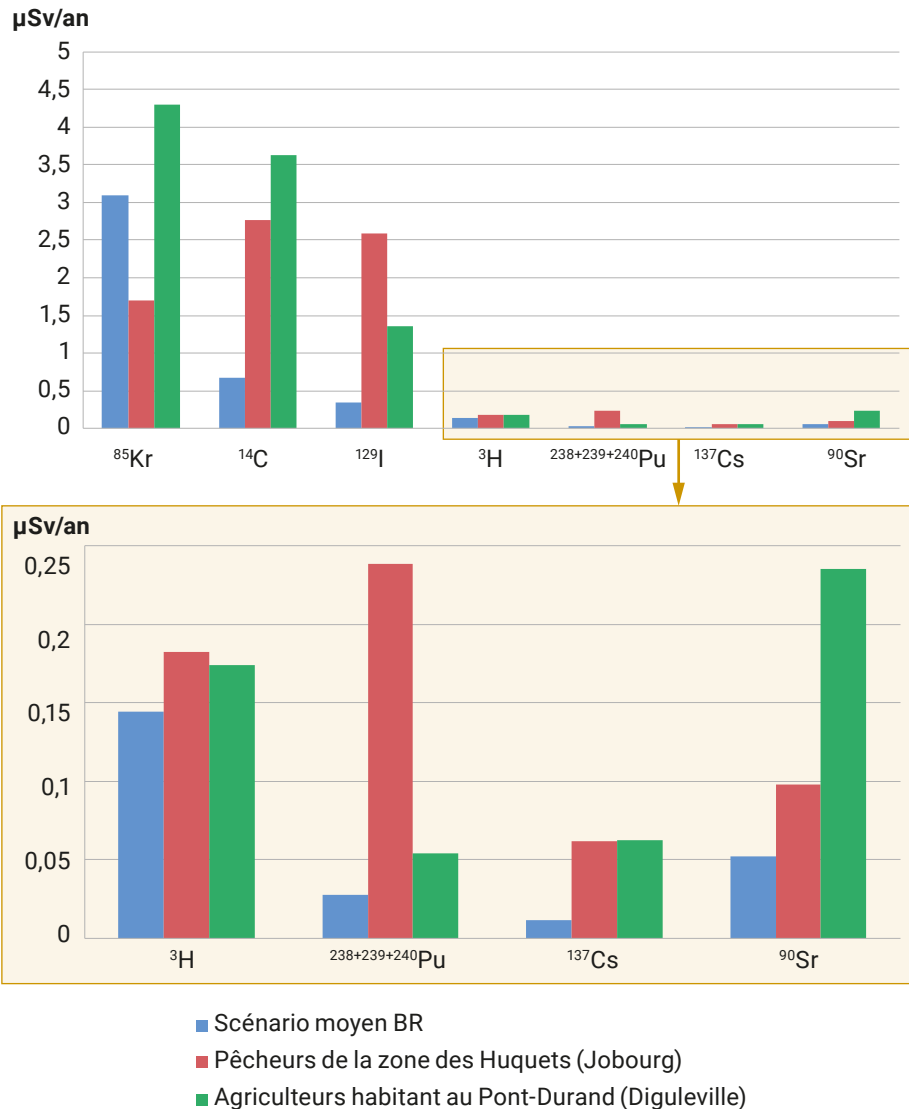
Ces estimations, fondées sur des activités moyennes calculées à partir de résultats de mesures issus de la surveillance de l'environnement, sont cohérentes avec celles réalisées par Orano pour l'année 2019 sur la base des rejets réels. En effet, Orano a estimé une dose efficace potentiellement reçue par un pêcheur de Goury à 6,7 µSv/an et à 14,2 µSv/an, celle reçue par un agriculteur de Digulleville.

TABLEAU 5 / QUANTITÉ DE DENRÉES LOCALES CONSOMMÉES

Aliments	Pêcheur de la zone des Huquets	Agriculteur habitant au pont Durand	Scénario moyen BR : personne vivant dans le nord Cotentin 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 fromage blanc, le fromage de vache et la matière grasse animale (beurre).

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 2018 et 2020, 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.



Prélèvement de Patelles à proximité du site de La Hague

© Orano

© Orano

Le centre de stockage de l'Aube et le centre 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). Ce centre de stockage est autorisé à accueillir 1 million de m³ de colis de déchets radioactifs. À fin 2020, 35,3 % 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 2020, 63,4 % de cette capacité totale de stockage autorisée étaient atteints.

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

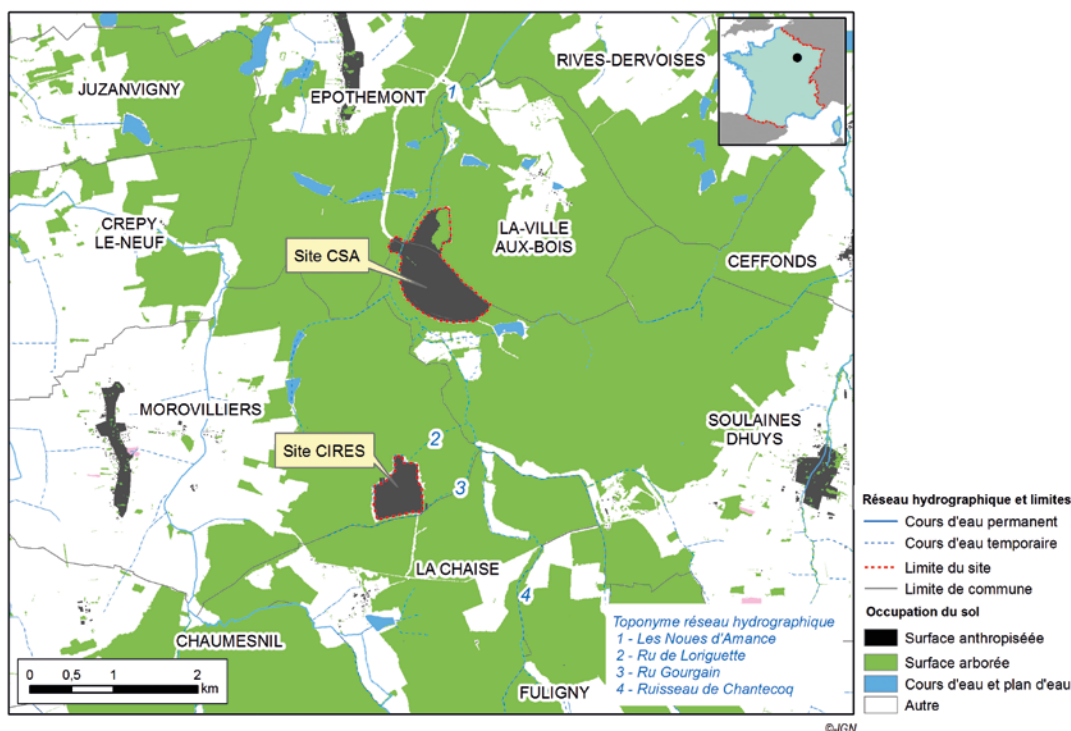


FIGURE 2 / LE CENTRE DE STOCKAGE DE L'AUBE (CSA)



© DR

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



© Andra

Les déchets TFA sont essentiellement des gravats, des terres, des ferrailles... très faiblement contaminés. 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. 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 à l'atmosphère sont le tritium, les iodures radioactifs et le carbone-14.

La surveillance des éléments gazeux, poussières et aérosols est effectuée avant rejet à 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 - activités alpha/bêta globales et émetteurs alpha et bêta-gamma), de cartouches à charbon actif (permettant le piégeage des iodures 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 de rejets. Depuis 2006, les rejets annuels en tritium, radionucléide le plus fréquemment mesuré dans les rejets gazeux du CSA, varient de 0,055 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, ^{14}C , 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 en tritium, radionucléide le plus fréquemment mesuré dans les rejets liquides du CSA, ont varié de 0,2 à 2,1 MBq.

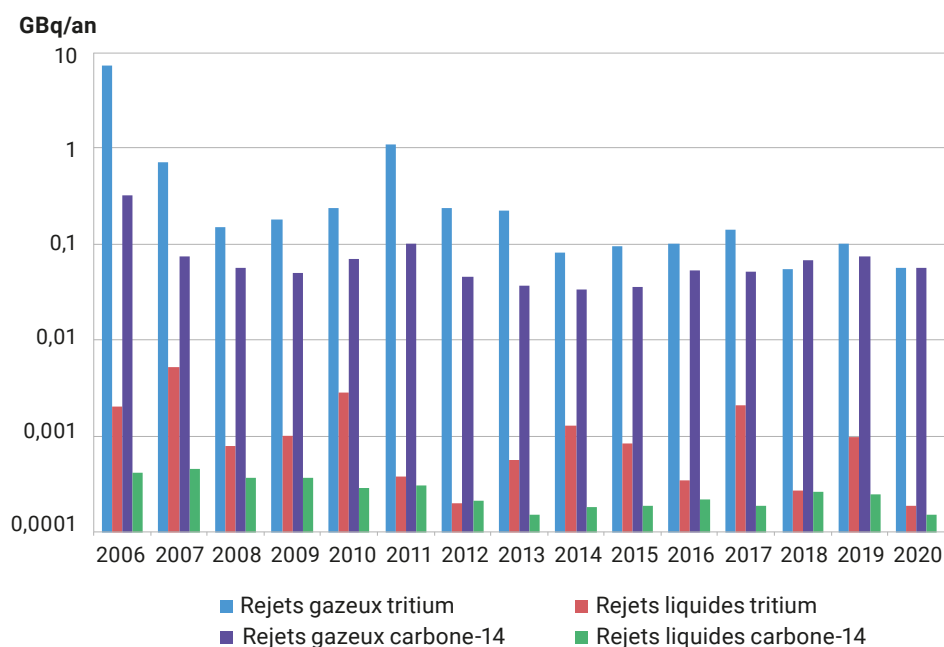
Rejets radioactifs du Cires

Les rejets gazeux 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 iodures 125, 129 et 131, du ^{14}C et des activités alpha et bêta globales).

Ces rejets canalisés sont soumis par arrêté préfectoral à des valeurs limites de rejets. Au cours de cette dernière décennie, les rejets annuels en tritium, mesurés dans les rejets gazeux du Cires, varient de 32 à 630 MBq.

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 à l'environnement. Les autres effluents liquides (eaux pluviales, effluents domestiques...) sont collectés, traités pour certains d'entre eux (décantation, déshuilage) 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 EN TRITIUM ET EN ¹⁴C DU CSA DE 2006 À 2020



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 ¹⁴C atmosphérique par barboteur, pour laquelle les seuils de décision des méthodes utilisées sont proches du bruit de fond atmosphérique, la surveillance des iodures 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 2018 et 2020. 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 le 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 2018 et décembre 2020, les activités en tritium sont majoritairement inférieures au seuil de décision d'environ 2 Bq/L. Quatre valeurs significatives sont relevées sur la période (de l'ordre de 4±2 Bq/L), mais celles-ci restent proches de la gamme du bruit de fond actuel, ce qui atteste de l'absence d'un marquage visible lors des événements pluvieux. Cette absence d'influence des rejets atmosphériques tritiés est confirmée par les résultats des mesures de ce radionucléide dans les échantillons d'herbe réalisés sur la période 2018-2020. Les activités de tritium organiquement lié correspondantes sont pour la plupart inférieures au seuil de décision. L'activité maximale mesurée en tritium organiquement lié est de 1,7 Bq/kg sec, c'est-à-dire dans la gamme du bruit de fond actuel.

Les résultats de mesures dans les herbes de prairie en 2018, jusqu'au troisième trimestre, font état d'une très forte variabilité de l'activité en carbone-14 associée à des incertitudes de mesures pouvant atteindre 40 % de la valeur mesurée, comme dans le bilan radiologique 2015-2017. À partir du quatrième trimestre 2019, l'Andra a mis en œuvre une métrologie plus performante. Les activités en carbone-14 mesurées entre fin 2019 et fin 2020 sont comprises entre 221 et 230 Bq/kg de carbone, avec une moyenne à 224 Bq/kg

TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DE L'EXPLOITANT ET DE L'IRSN DANS L'ENVIRONNEMENT DU CSA ET DU CIRES

	Exploitant	IRSN
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> • 20 points autour du CSA • 13 points autour du CIRES et un point au sud de celui-ci 	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 prélèvements des poussières atmosphériques sur filtres : activités α et β globales sur filtre (quotidien), spectrométrie γ si β global > 2 mBq/m³ • 2 points de prélèvements : halogènes en spectrométrie γ (hebdomadaire) • 2 points de prélèvements : tritium dans l'air HTO-HT (hebdomadaire) • 1 point de prélèvement : carbone-14 dans l'air 	1 point de prélèvement des poussières atmosphériques sur filtres : spectrométrie γ (hebdomadaire)
Eau de pluie	2 points de prélèvements : activités α et β globales et tritium (hebdomadaire)	1 point de prélèvement : tritium (mensuel)
Végétaux terrestres	2 points de prélèvements : spectrométrie γ (mensuel) et tritium et carbone-14 (annuel)	
Sol	2 points de prélèvements : activités α et β globales, spectrométries α et γ (annuel)	
Lait	2 points de prélèvements : spectrométrie γ (trimestriel) et tritium et carbone-14 (annuel)	
Champignons et principales productions agricoles	2 points de prélèvements : activités α et β globales, spectrométrie γ et tritium et carbone-14 (annuel)	
Eau de cours d'eau	<ul style="list-style-type: none"> • 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : activités α et β globales, teneur en potassium et tritium (hebdomadaire), spectrométries α et γ (mensuel) • 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en amont du site : activités α et β globales, spectrométries α et γ, teneur en potassium et tritium (mensuel) • 1 point de prélèvement dans la Voire en aval du site : activités α et β globales, teneur en potassium et tritium (mensuel) 	1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : activités α et β globales, spectrométrie γ , teneur en potassium, tritium et strontium-90 (semestriel)
Sédiments	<ul style="list-style-type: none"> • 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : activités α et β globales, teneur en potassium et tritium, spectrométries α et γ (mensuel) • 1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en amont du site : activités α et β globales, teneur en potassium et tritium, spectrométries α et γ (trimestriel) • 1 point de prélèvement dans la Voire en aval du site : activités α et β globales, teneur en potassium et tritium, spectrométries α et γ (trimestriel) 	1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : spectrométries α et γ , strontium-90 (semestriel)
Végétaux aquatiques	1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : activités α et β globales, spectrométries α et γ (semestriel)	1 point de prélèvement dans les Noues d'Amance en aval du site : spectrométrie γ (semestriel)
Poisson	2 points de prélèvement dans les Noues d'Amance (au point de rejet et en aval du site) : activités α et β globales, spectrométries α et γ (annuel)	
Eaux de nappe	24 points de prélèvements : activités α et β globales, teneur en potassium et tritium (mensuel à annuel selon le point)	

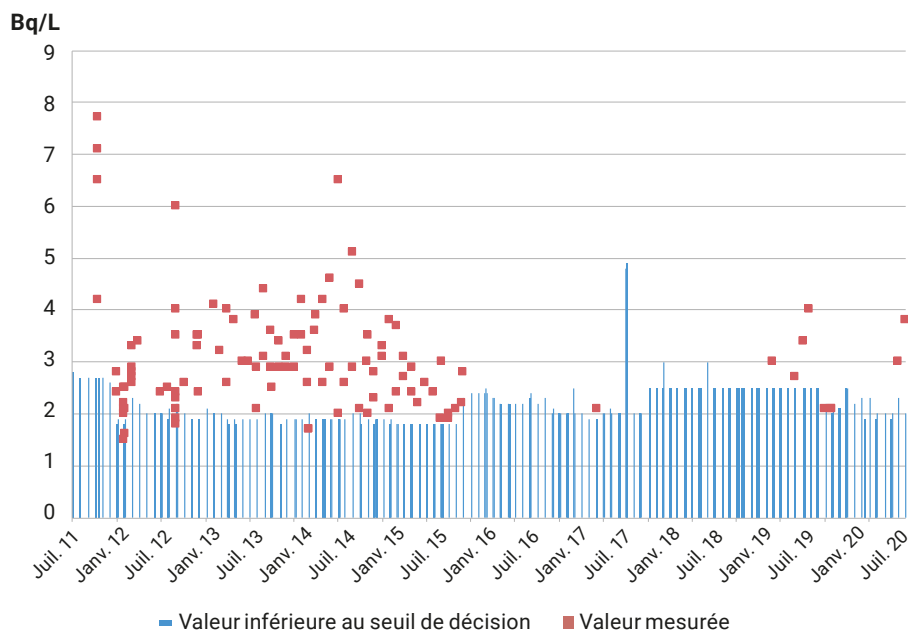
de carbone. Ces résultats sont de l'ordre des niveaux mesurés en carbone-14 dans les zones en dehors de toute influence des rejets des sites nucléaires (225 ± 7 Bq/kg de carbone). Les autres mesures réalisées dans l'environnement de ces deux centres de stockage relèvent soit de la radioactivité naturelle (^{40}K , ^7Be ...), soit de la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl ou de celles des essais d'armes nucléaires (^{137}Cs).

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, les poissons et les végétaux aquatiques (renoncules), les mesures réalisées ne mettent pas en évidence un marquage du milieu aquatique par les rejets des centres exploités par l'Andra.

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 2015-2017 (une seule détection), le tritium a été détecté un peu plus souvent dans les eaux souterraines. En effet, à partir de janvier 2018 (figure 5), le tritium a été détecté huit fois avec une valeur d'activité maximale de $4 \pm 2,3$ Bq/L, proche néanmoins du bruit de fond dans un piézomètre situé à proximité des ouvrages de stockage. Les mesures en émetteurs alpha et émetteurs bêta n'ont pas mis en évidence de marquage par les rejets des centres de l'Andra.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS LES EAUX SOUTERRAINES PRÉLEVÉES DANS LES PIÉZOMÈTRES DES CENTRES CSA ET CIRES ENTRE JUILLET 2011 ET DÉCEMBRE 2020 (tous piézomètres confondus) (Bq/L)



3.4. LES SITES DE RECHERCHE

Le site de Bruyère-le-Châtel

Le site CEA de Bruyère-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). Il comprend une INBS.

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.

FIGURE 1 / LOCALISATION DU SITE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL ET DES POINTS DE PRÉLÈVEMENTS DU CEA

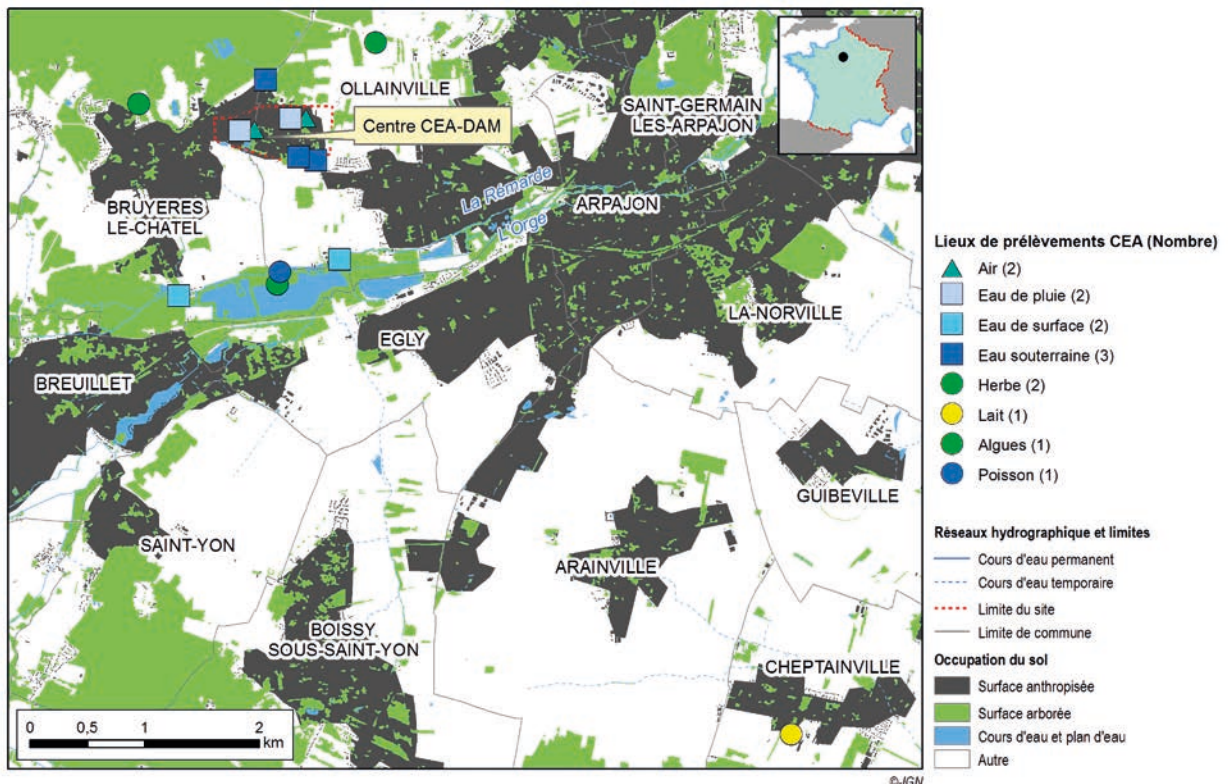
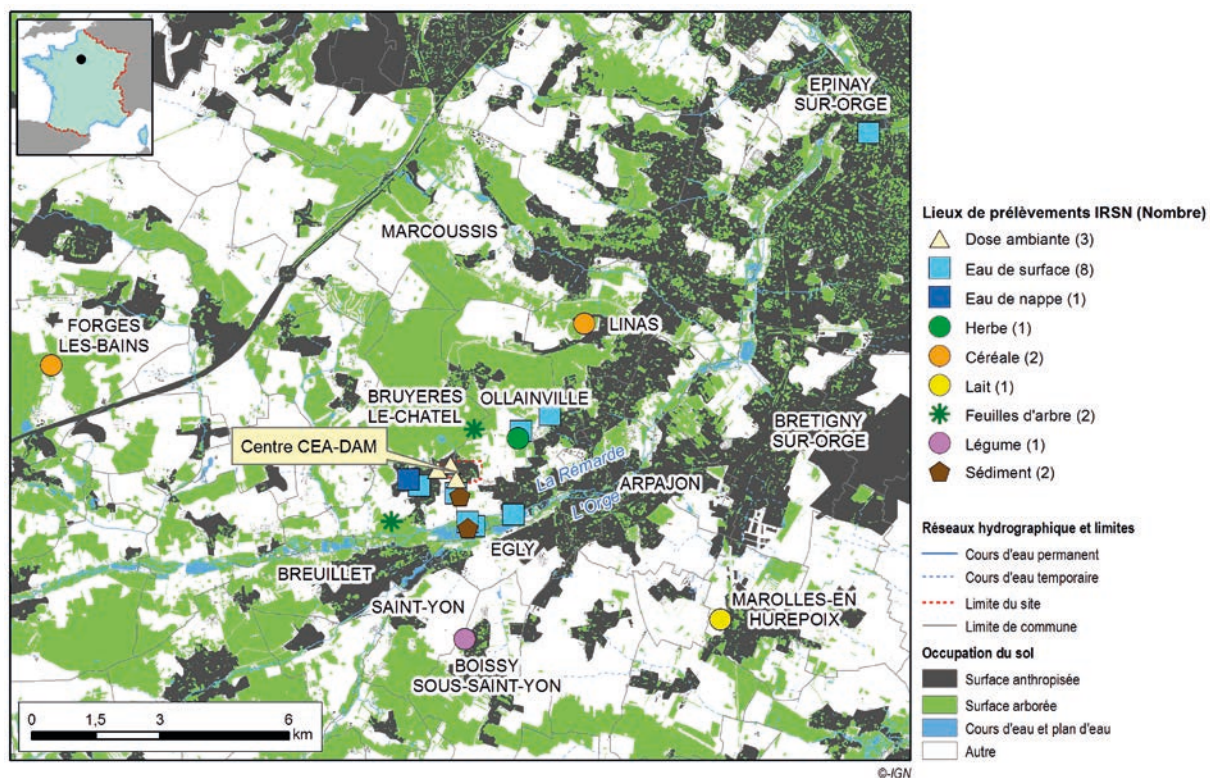


FIGURE 2 / LOCALISATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENTS DE L'IRSN



Prélèvement d'eau de surface dans les environs du site de Bruyères-le-Châtel

Le tritium est également présent dans les rejets liquides du site issus des effluents liquides industriels et des eaux pluviales. Les rejets liquides en tritium ont chuté d'un facteur 7 depuis 2007. Ils se maintiennent depuis 2017 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.

La surveillance radiologique de l'environnement du site

La surveillance de l'environnement (figures 1 et 2) est réalisée dans les milieux atmosphérique (précipitations et gaz), terrestre (végétaux et denrées) et aquatique

(sédiments, flore et faune, eaux de cours d'eau et de nappe).

Jusqu'en octobre 2013, les mesures de tritium dans l'air portaient sur le tritium total, puis à partir de 2014, les différentes formes (tritium de la vapeur d'eau et tritium gazeux) ont été mesurées séparément. L'influence des rejets gazeux en tritium était visible sporadiquement dans l'atmosphère, en gaz tritié (HT) et vapeur d'eau tritiée (HTO), grâce aux barboteurs installés aux quatre points cardinaux autour du site (figure 5) jusqu'en 2012 et uniquement à l'est et à l'ouest jusqu'en 2014. Les quelques déterminations concomitantes de tritium sous formes HT et HTO obtenues par le passé montraient des contributions similaires de ces deux formes.

FIGURE 3 / ÉVOLUTION DES REJETS GAZEUX EN TRITIUM DU SITE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL ENTRE 2003 ET 2020

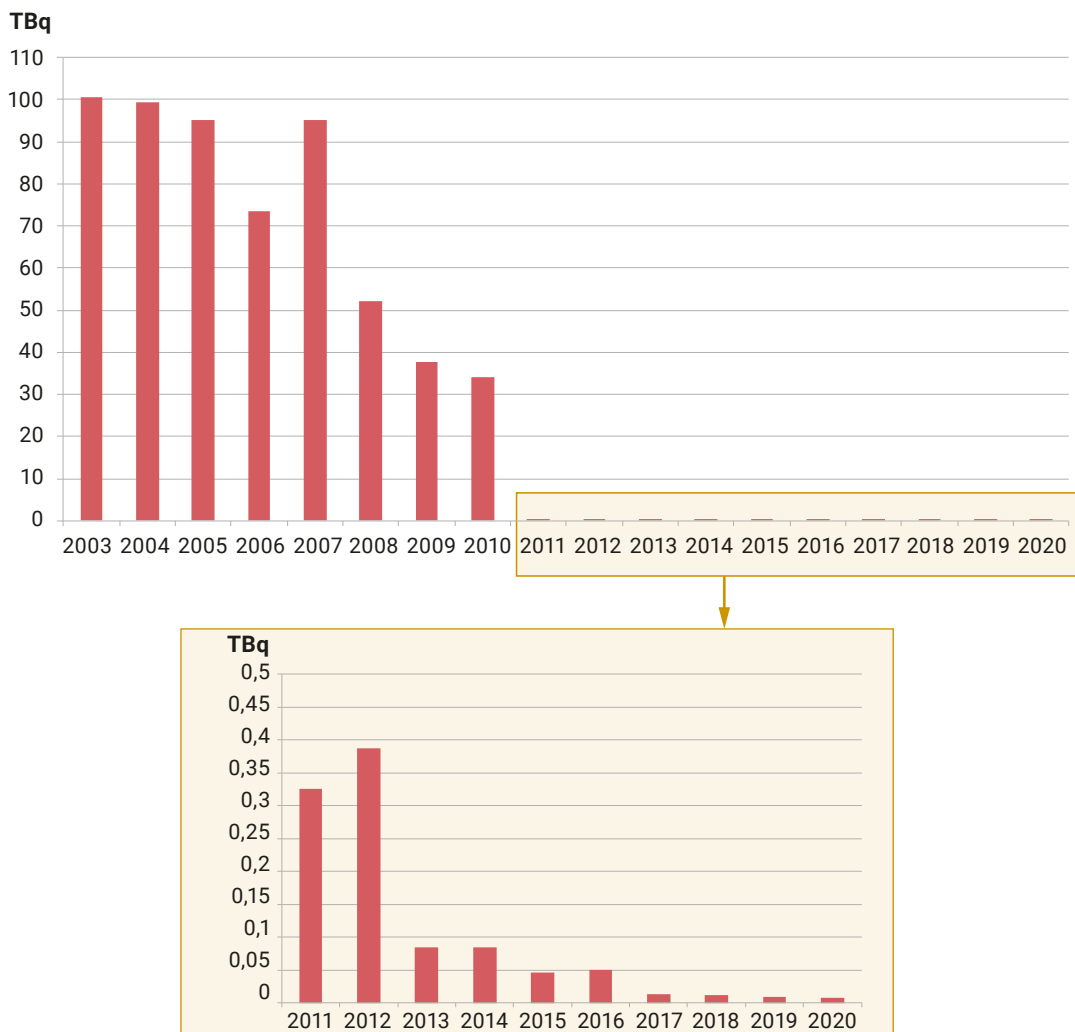
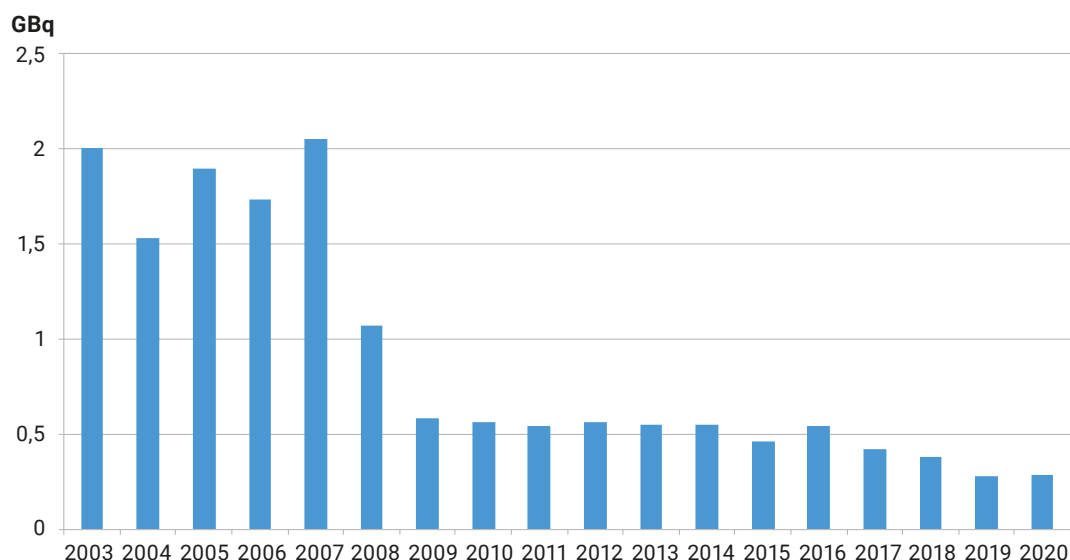


FIGURE 4 / ÉVOLUTION DES REJETS LIQUIDES EN TRITIUM DU SITE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL



Influence du site sur son environnement

Les concentrations en tritium dans l'air autour du site sont en diminution depuis 2009 en lien avec la diminution des rejets atmosphériques de ce radionucléide (figure 5). 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 du tritium dans l'air.

Concernant les mesures de tritium effectuées dans l'eau de pluie sur la période 2018-2020 (figure 6), seuls 9 résultats de mesure ont donné des valeurs supérieures au seuil de décision de 10 Bq/L requis réglementairement. Avec des valeurs comprises entre 10 et 49 Bq/L, ces activités volumiques ponctuellement mesurées sont très supérieures au bruit de fond qui est de 1 Bq/L dans une gamme allant de 0,5 à 2 Bq/L. On observe cependant une diminution de ces valeurs maximales mesurées par rapport à la période précédente, du fait de la diminution des rejets.

La surveillance des eaux de surfaces (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 niveaux en 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 7). 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 2018-2020, les mesures effectuées par le CEA montrent des activités volumiques de tritium inférieures au seuil de décision de 10 Bq/L fixé réglementairement. En revanche, les prélèvements réalisés par l'IRSN à fréquence semestrielle, témoignent régulièrement de l'influence des rejets tritiés du centre CEA sur les eaux de nappes. Entre 2018 et 2020, le tritium a été détecté dans 65 % des échantillons et l'activité mesurée y a été supérieure au bruit de fond actuel de ce radionucléide (environ 1 Bq/L) dans 80 % des cas. L'activité moyenne du tritium sur cette période s'établit à environ 10 Bq/L.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'AIR À PROXIMITÉ DU SITE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL ENTRE JANVIER 2009 ET DÉCEMBRE 2020 – BARBOTEURS DES STATIONS NORD, SUD, EST ET OUEST (tritium total) JUSQU'EN OCTOBRE 2013 PUIS TRITIUM HTO (Bq/m³)

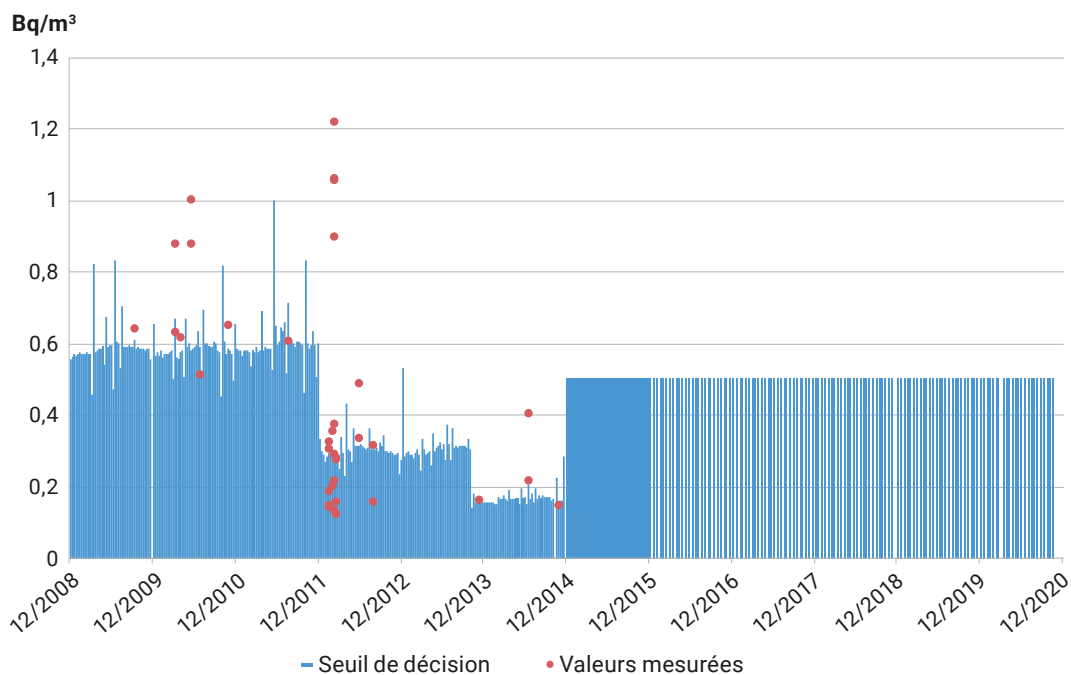
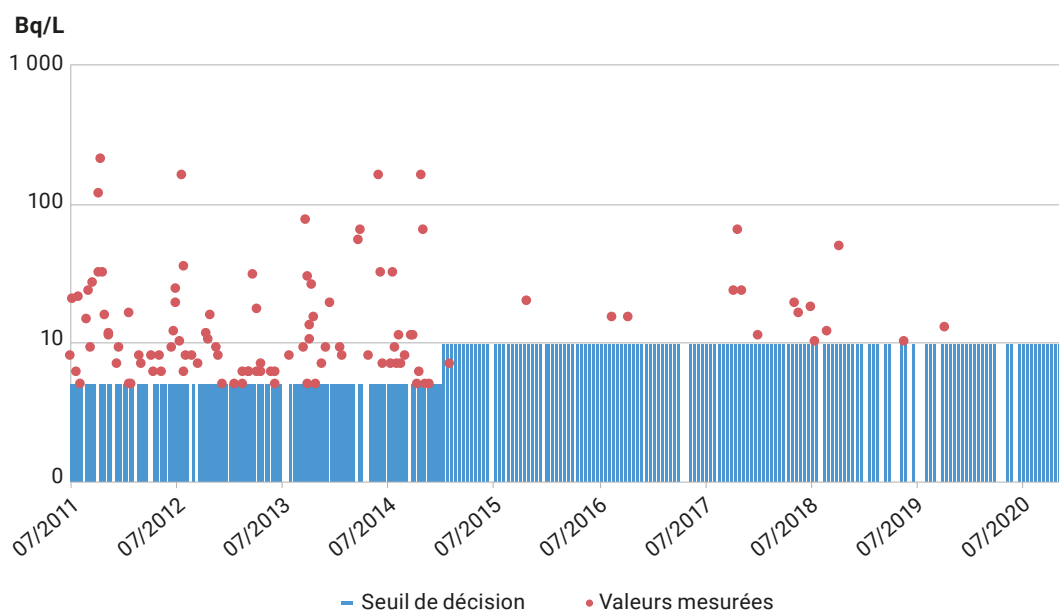


FIGURE 6 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE À PROXIMITÉ DU SITE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL ENTRE JANVIER 2009 ET DÉCEMBRE 2020 (Bq/L)



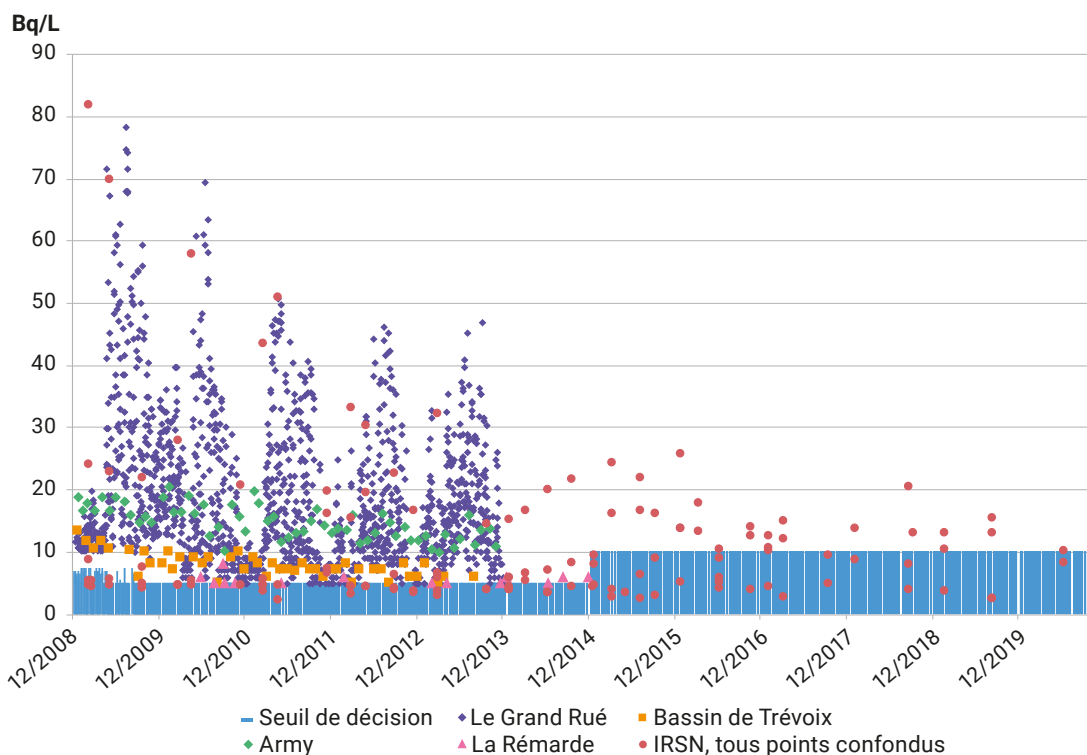
Les eaux souterraines du site font également l'objet de prélèvements semestriels et de mesures de tritium en amont (1 point) et en aval hydrogéologique du site (2 points), depuis 2016. Si les activités mesurées restent inférieures au seuil de décision (10 Bq/L) dans les eaux de nappe hors influence du site, les activités mesurées au niveau du site témoignent de son influence, avec des activités comprises entre 37 Bq/L et 110 Bq/L depuis 2016 (moyenne 83 Bq/L).

Les résultats dans les prélèvements mensuels d'herbe sont tous inférieurs aux seuils de décision entre 2018 et 2020, en lien avec la diminution des rejets atmosphériques. Les mesures réalisées en TOL dans les végétaux terrestres par l'IRSN sont depuis 2018 comprises en 0,5 et 3 Bq/kg sec. 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

La surveillance radiologique de l'environnement du site CEA de Bruyères-le-Châtel montre que l'influence des rejets du site est aujourd'hui discrète dans l'environnement terrestre. La baisse continue des rejets, associée à une rémanence de moins en moins prononcée du tritium dans l'environnement ne permettent plus, compte tenu des seuils de décisions fixés réglementairement, de quantifier les niveaux en tritium dans l'environnement et de procéder à une évaluation dosimétrique. Toutefois, la dose de 0,1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, estimée par calcul par le CEA sur la base des rejets de 2019 et indiquée dans le *Livre Blanc du tritium* publié par l'ASN, semble cohérente avec les résultats de mesure disponibles sur la période 2018-2020.

FIGURE 7 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS LES EAUX DE SURFACE PRÉLEVÉES À PROXIMITÉ DU SITE CEA DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL ENTRE JANVIER 2009 ET DÉCEMBRE 2020 (Bq/L)



Le site de Cadarache

Le site CEA de Cadarache (figure 1) a été créé le 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 site de Cadarache regroupe :

- 21 installations nucléaires de base (INB) ;
- 23 installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) hors INB, dont 14 à « caractère nucléaire » ;
- 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.

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 189 GBq/an (tableau 1 et figure 2). En comparaison du tritium, l'activité de ^{14}C rejetée dans l'atmosphère est, selon les années environ 10 à 100 fois plus faible.

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 d'uranium et de radionucléides artificiels dans les réseaux d'eaux pluviales de l'INB 52-ATUE (en octobre 2019) et de l'INB 37B (en décembre 2018), respectivement, ainsi que des dépassements du seuil de décision sur les contrôles de rejets tritiés de l'INB 156 (CHICADE) (survenus de 2018 à 2020) 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.

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 milieu terrestre, des prélèvements trimestriels de lait et de végétaux sont réalisés sous les vents dominants, avec des analyses complémentaires annuelles. 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.

En complément des prélèvements réalisés en milieu terrestre, des dosimètres disposés 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 lieu-dit Saint-Eucher. Les prélèvements d'eau font en particulier l'objet de mesures mensuelles d'activités alpha et bêta globales et de tritium, complétées ponctuellement (notamment en aval) par des mesures du strontium-90, de spectrométrie gamma et de spectrométrie alpha. Des prélèvements de sédiments, de végétaux aquatiques et de poissons dans la Durance, sont réalisés à raison d'une campagne annuelle. Ils font à minima l'objet de spectrométrie gamma et alpha et de mesures du strontium-90.

FIGURE 1 / LE SITE DE CADARACHE



© CEA Cadarache

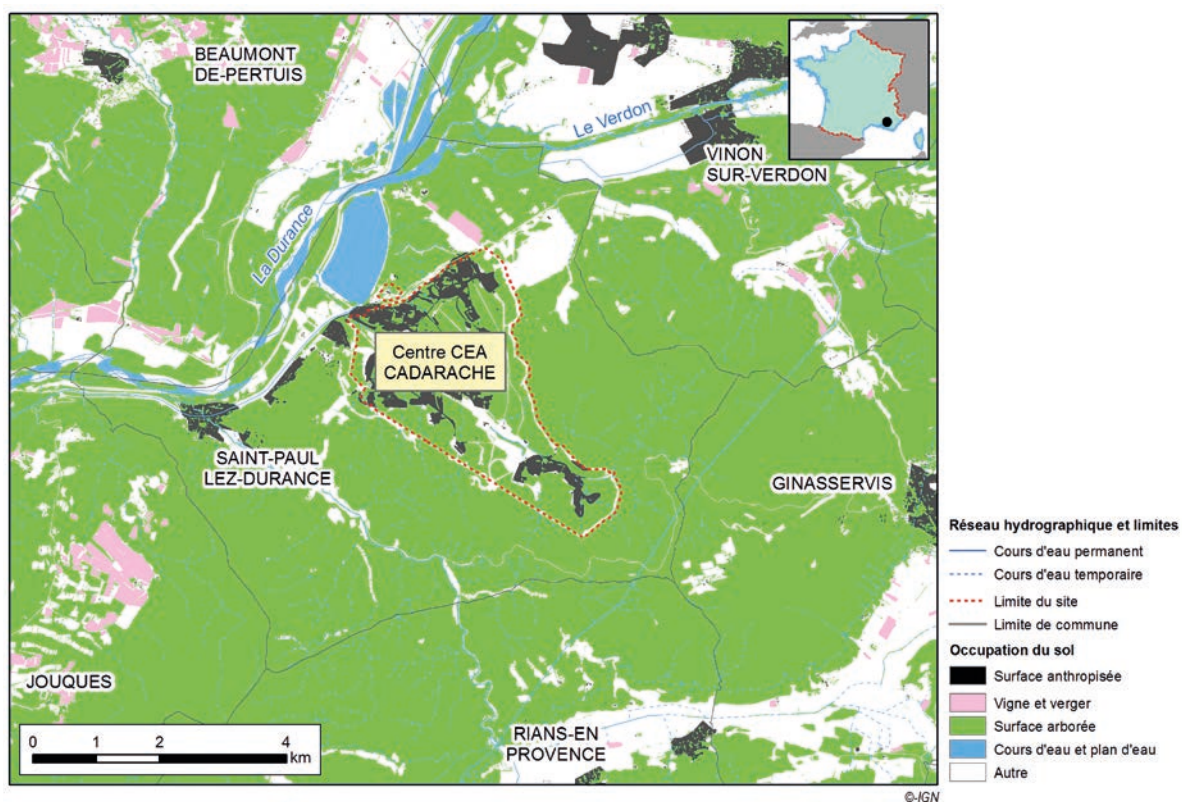


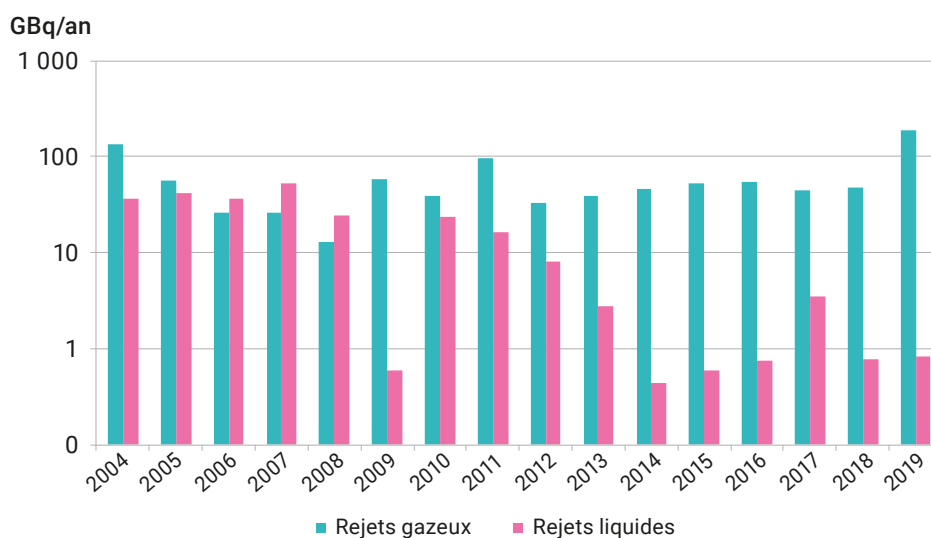
TABLEAU 1 / ACTIVITÉS REJETÉES ANNUELLEMENT PAR VOIE ATMOSPHÉRIQUE ENTRE 2015 ET 2019 (en GBq/an) - SOURCE CEA

	Tritium	Carbone-14	Gaz rares	Halogènes	Émetteurs bêta-gamma	Émetteurs alpha
2015	52,7	4,1	16 970	0,001	0,002	0,00001
2016	54,3	0,9	11 284	0,001	0,002	0,00001
2017	45,3	0,9	11 765	0,001	0,002	0,00001
2018	47,7	6,1	11 707	0,002	0,002	0,00001
2019	189	1,3	12 225	0,001	0,002	0,00001

TABLEAU 2 / ACTIVITÉS REJETÉES ANNUELLEMENT PAR VOIE LIQUIDE ENTRE 2009 ET 2019 (en GBq/an) - SOURCE CEA

Paramètres	Tritium	Carbone-14	Mesure bêta globale	Mesure alpha globale
Activité rejetée en 2009	0,6	0,006	0,26	0,000202
Activité rejetée en 2010	23,64	0,008	0,18	0,000208
Activité rejetée en 2011	16,4	0,0103	0,201	0,000446
Activité rejetée en 2012	8,1	0,00458	0,28	0,000185
Activité rejetée en 2013	2,79	0,00219	0,29	0,000195
Activité rejetée en 2014	0,44	0,0019	0,32	0,00018
Activité rejetée en 2015	0,59	0,0019	0,23	0,00012
Activité rejetée en 2016	0,75	0,002	0,23	0,0002
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

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



Un contrôle des eaux souterraines sous-jacentes aux installations est réalisé mensuellement par des prélèvements effectués à partir de 44 piézomètres. Sur ces prélèvements, sont déterminées les activités alpha et bêta globales et celles du tritium ainsi que la concentration en potassium. 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).

Les résultats de mesure correspondant, qui concernent le sous-sol intérieur du centre, ne sont pas déversés dans le RNM et ne sont donc pas exploités dans le présent rapport.

À ce plan de surveillance viennent s'ajouter la surveillance réalisée par l'IRSN et les analyses effectuées ponctuellement, par exemple à la demande de l'ASN dans le cadre d'inspections avec prélèvements dans l'environnement.

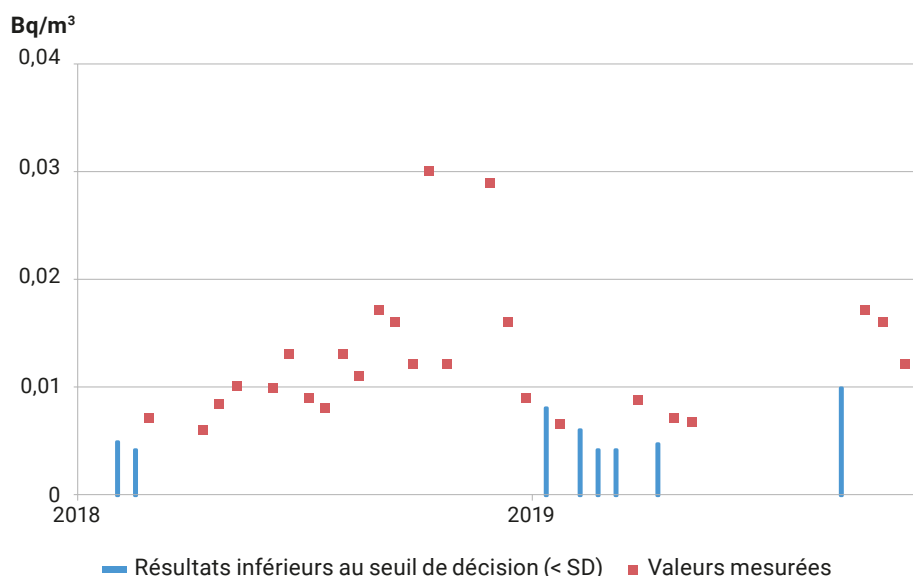
Influence du site de Cadarache sur l'environnement

Le tritium

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). Les résultats de mesure acquis par l'IRSN permettent de quantifier les activités volumiques en dessous de ces seuils de décision. Ainsi, l'activité volumique dans l'air sous forme HTO (prélèvements par l'IRSN par piègeurs passifs expérimentaux) en 2018 et en 2019 est en moyenne 0,012 Bq/m³ d'air (figure 3). Cette moyenne correspond au bruit de fond naturel et hérité des retombées des essais nucléaires ; les deux valeurs les plus élevées, proches de 0,03 Bq/m³, se situent à la limite supérieure de la gamme de variabilité de ce bruit de fond.

Dans les eaux de pluie collectées à proximité du site, seules quatre mesures de l'activité volumique du tritium supérieure au seuil de décision (de l'ordre de 2,2 Bq/L) ont été réalisées entre 2018 et 2020 (1,9 à 3,6 Bq/L). Ces valeurs sont cohérentes avec celles mesurées 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 Bq/m³ d'air).

FIGURE 3 / ACTIVITÉ VOLUMIQUE EN TRITIUM SOUS FORME HTO DANS L'ATMOSPHÈRE PRÉLEVÉE PAR PIÈGEUR PASSIF SUR LE SITE DU CEA CADARACHE (en Bq/m³)



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 en tritium supérieure au seuil de décision (de l'ordre de 4 Bq/L).

Parmi les 372 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 en tritium dans les légumes et le lait prélevés en 2018 et en 2019 sont également inférieures au seuil de décision.

Le carbone-14

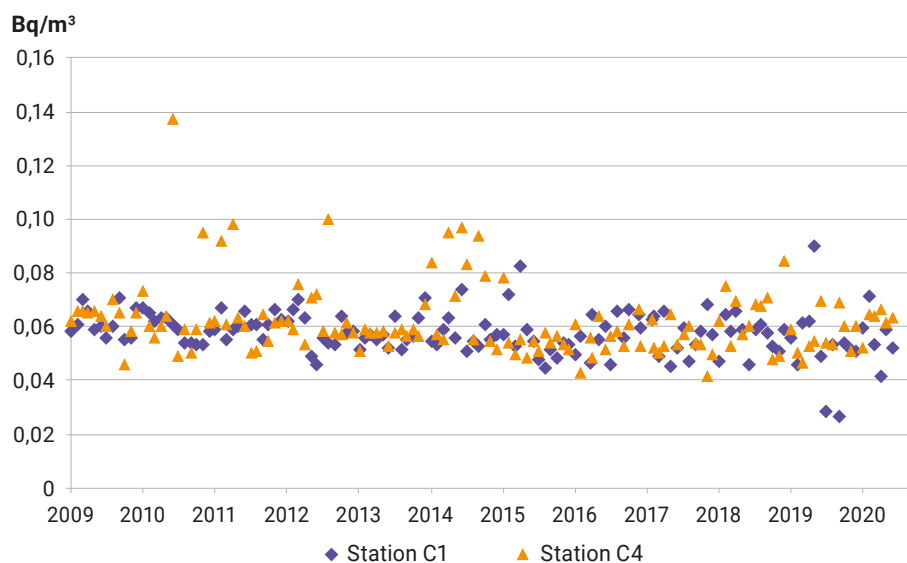
Le carbone-14 atmosphérique est prélevé à l'aide de barboteurs. Les résultats obtenus entre 2018 et 2020 varient entre 0,027 et 0,090 Bq/m³ pour une valeur moyenne de l'ordre de 0,06 Bq/m³. Ces valeurs sont comparables à celles mesurées précédemment, entre 2015 et 2017 (0,042 à 0,094 Bq/m³). La valeur moyenne (0,06 Bq/m³) est supérieure au bruit de fond radiologique français (0,04 Bq/m³), témoignant ainsi d'une faible influence des rejets de carbone-14 du site de Cadarache (figure 4).

Cette activité ajoutée dans l'air ne serait pas discernable par des mesures classiques exprimées en Bq/kg frais. Seule la qualité des mesures effectuées par le CEA, dont les résultats sont exprimés en Bq/kg de carbone, permet de la quantifier. Ainsi, malgré les incertitudes métrologiques, l'activité moyenne de carbone-14 dans les échantillons de thym et de légumes prélevés en 2018 et 2019 dans les villages avoisinants, d'une valeur de 240 Bq/kg de carbone, est supérieure à la valeur moyenne du bruit de fond du carbone-14 en milieu terrestre qui est de 225 Bq/kg de C (dans une gamme allant de 218 à 232 Bq/kg de C). En revanche, les analyses effectuées dans le lait ne font apparaître aucun excès de carbone-14.

Le carbone-14 est aussi mesuré dans les poissons de la Durance prélevés en 2017 et 2018 à une activité moyenne de 21 Bq/kg frais, activité massique similaire à celle du bruit de fond pour ces indicateurs (de l'ordre de 20 à 25 Bq/kg frais, cf. chapitre 2).

Sur la base de ces résultats, les doses efficaces dues au carbone-14, potentiellement reçues par des adultes résidant à proximité du site et qui consommeraient des denrées produites localement, seraient de l'ordre de 0,05 µSv/an (par inhalation et ingestion de carbone-14).

FIGURE 4 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU CARBONE-14 DANS L'AIR À PROXIMITÉ DU SITE DE CADARACHE ENTRE JANVIER 2009 ET JUIN 2020 - BARBOTEURS DES STATIONS ATMOSPHÉRIQUES DE GINASSERVIS (C1) ET SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE (C4) (en Bq/m³)



Autres radionucléides

À proximité des INB 56 et 164 (CEDRA), l'activité volumique en radon dans l'air est mesurée grâce à deux stations permettant d'effectuer des mesures en continu. Les valeurs moyennes observées durant la période 2018-2019 (27 et 5 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 (cf. chapitre 2).

Une activité volumique en strontium-90 significative a été mesurée dans l'eau de la Durance prélevée en 2019 (0,026 Bq/L). Concernant les sédiments de la rivière, deux prélèvements réalisés la même année présentent des traces de césium-137 (1,27 et 1,25 Bq/kg sec) et de plutonium-239+240 (0,019 Bq/kg sec), imputables aux retombées atmosphériques anciennes de ces radionucléides (essais nucléaires et accident de Tchernobyl).

Lorsqu'il est détecté, le césium-137 recherché 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 ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, recherché dans les sols et les légumes.

Dans le cadre des inspections réalisées par l'IRSN à la demande de l'ASN, des échantillons de sédiments ont été prélevés entre 2010 et 2019 dans le Ravin de la Bête, à l'extérieur et à l'intérieur du site de Cadarache ainsi qu'en aval, dans la Durance. Un marquage des sédiments en émetteurs alpha (²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et ²⁴¹Am) est observé dans les échantillons du Ravin de la Bête que ce soit à l'extérieur ou à l'intérieur du site, avec des activités massiques des transuraniens 5 à 10 fois supérieures à celles observées en moyenne dans les sédiments français. Les rapports d'activités isotopiques (²³⁸Pu/²³⁹⁺²⁴⁰Pu et ²⁴¹Am/²³⁹⁺²⁴⁰Pu) confirment que les transuraniens mesurés dans le Ravin de la Bête ne proviennent pas des apports atmosphériques globaux (cf. chapitre 2). Des prélèvements et des mesures complémentaires ont été effectués dans le but d'établir le lien entre le marquage du Ravin de la Bête et les « contaminations historiques » à proximité de certaines installations nucléaires de Cadarache, qui résultent d'incidents de fonctionnement au cours des années 1960 à 1990.

Comme précisé plus haut, les mesures acquises en Durance, en aval du site, montrent que les traces de plutonium mesurées dans les sédiments de cette rivière (à Mirabeau et au pont de Pertuis) proviennent des retombées atmosphériques anciennes et non pas du site de Cadarache.

Débits d'équivalent de dose dans l'air ambiant

Les dosimètres disposés en clôture du site donnent des valeurs moyennes du débit de dose ambiant de l'ordre de 75 nSv/h, ce qui correspond à l'irradiation naturelle. Seul le dosimètre situé à proximité de la Porte de Ginasservis (sud du site de Cadarache) enregistre des débits de dose supérieurs à cette valeur, de l'ordre de 130 nSv/h.



© G. Lesénéchal/CEA

Prélèvement d'eau de source dans l'environnement du site de Cadarache

Le site du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds) à Caen

Le Grand accélérateur national d'ions lourds (GANIL) (figure 1) 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 (TGIR) 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 rejets d'effluents gazeux sont effectués lors des campagnes de fonctionnement des accélérateurs. L'installation d'origine a été opérationnelle 9,5 mois sur la période 2018-2020 et SPIRAL2, mise en service en octobre 2019, a été en fonctionnement 7 mois jusqu'à la fin de l'année 2020 (fonctionnement à faible intensité dans le cadre des essais de démarrage). En dehors de ces périodes de fonctionnement, les rejets sont 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 très 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. Aucun rejet liquide radioactif n'a été effectué depuis l'entrée en vigueur de l'autorisation de transfert.

TABLEAU 1 / ÉVOLUTION DES REJETS GAZEUX DE L'INSTALLATION D'ORIGINE DEPUIS L'AUTORISATION DE REJETS DU 7 JUILLET 2015

Année	Tritium (GBq)	Gaz rares (GBq)	Iodes (GBq)	Autres émetteurs β et γ (GBq)
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

TABLEAU 2 / ÉVOLUTION DES REJETS GAZEUX DE L'INSTALLATION SPIRAL2 DEPUIS L'AUTORISATION DE MISE EN SERVICE DU 27 JUIN 2019

Année	Tritium (GBq)	Gaz rares (GBq)	Iodes (GBq)	Autres émetteurs β et γ (GBq)
2019	0,006	0,21	$8,8 \cdot 10^{-5}$	65
2020	0,036	1,90	$3,7 \cdot 10^{-4}$	267

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 3 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 3). 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 bi-annuellement (^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.

L'IRSN réalise pour sa part une surveillance du tritium dans l'air à l'aide de piègeurs passifs de tritium, relevés à fréquence bimensuelle.

TABLEAU 3 / 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 prélèvements continus : 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 prélèvements continus : 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 prélèvements d'eaux de pluie : mesures mensuelles β global et ^3H
Lait	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvements : mesure mensuelle par spectrométrie γ et mesure annuelle de ^3H
Végétaux (herbes)	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvements (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 prélèvements (dont 1 et 5 km sous les vents) : mesure annuelle : spectrométrie γ, ^3H libre et lié, ^{40}K
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvements (1 et 5 km sous les vents) : mesure annuelle par spectrométrie γ
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> 5 points de prélèvements sur le site : mesures biannuelles β global, ^3H, ^{40}K

FIGURE 2 / CARTES DES LIEUX DE PRÉLÈVEMENTS ET DE MESURES

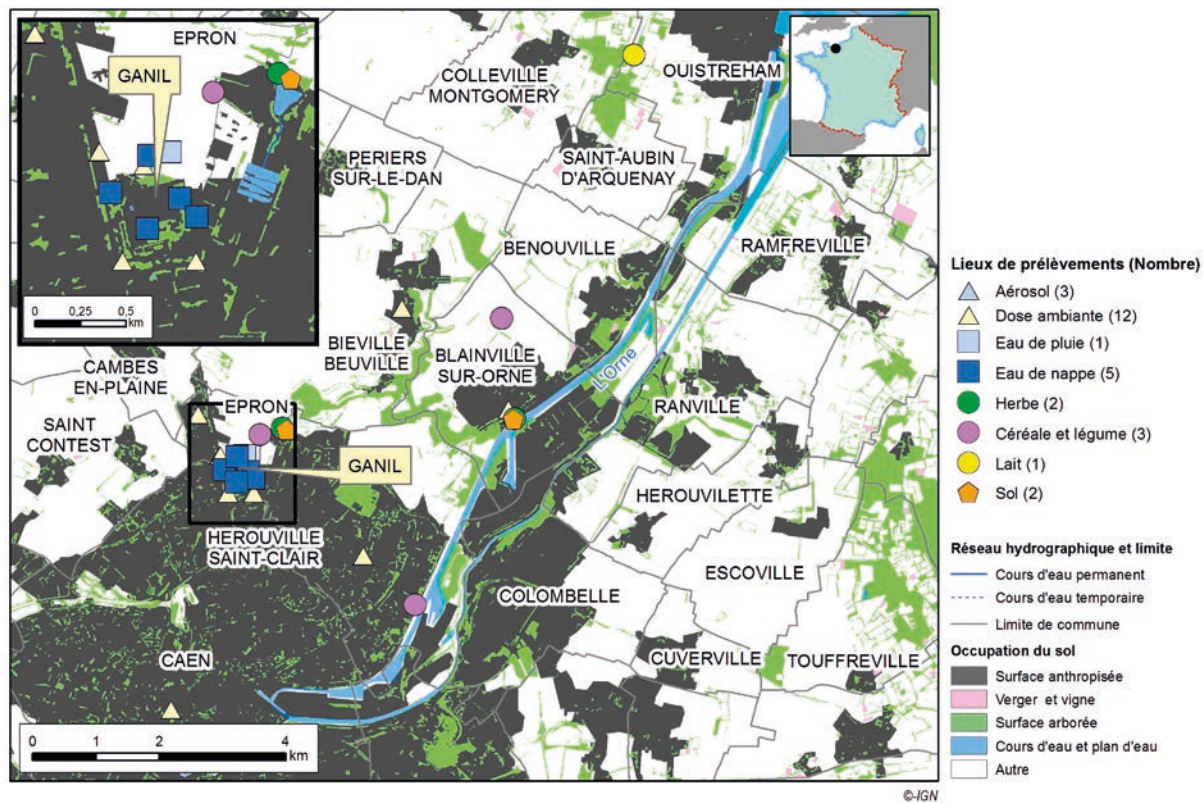


FIGURE 3 / VUE D'UNE STATION DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT



Influence du GANIL sur l'environnement

Parmi les radionucléides recherchés sous forme gazeuse dans l'atmosphère (iode-131, tritium), aucune mesure de l'exploitant 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) hormis les deux prélèvements du 14 au 30 avril 2020 qui présentent des activités de 0,096 et 0,079 Bq/m³ en tritium gazeux (HT). Les mesures IRSN en HTO présentent des valeurs significatives quasiment toujours comprises entre 0,01 et 0,03 Bq/m³, cohérentes avec bruit de fond induit par les retombées anciennes.

Dans les eaux de pluie collectées à proximité du site, le tritium n'a été mesuré à une activité supérieure au seuil de décision qu'à deux reprises sur la période 2018-2020, avec une activité maximale de 3,8 Bq/L. Cette valeur est à comparer à celle du bruit de fond du tritium dans la vapeur d'eau de l'air, hors influence des rejets d'une installation nucléaire, qui est actuellement de l'ordre de 1 Bq/L dans une gamme allant de 0,4 à 2 Bq/L.

Les mesures effectuées sur les échantillons prélevés dans la nappe phréatique présentent toutes des activités en tritium inférieures au seuil de mesure (4 Bq/L) pour la période 2018-2020.

En ce qui concerne le compartiment terrestre et les denrées, les résultats obtenus ne relèvent que de la radioactivité naturelle (⁴⁰K, ⁷Be...). Aucun des radionucléides artificiels recherchés n'a présenté d'activité supérieure au seuil de décision au cours de la période étudiée hormis un prélèvement de céréales effectué en juillet 2018 qui présentait une concentration en tritium organiquement lié de 0,738 Bq/kg frais. Cette valeur se situe tout à fait dans la gamme du bruit de fond du tritium dans l'environnement terrestre français.

Le site CEA de Fontenay-aux-Roses

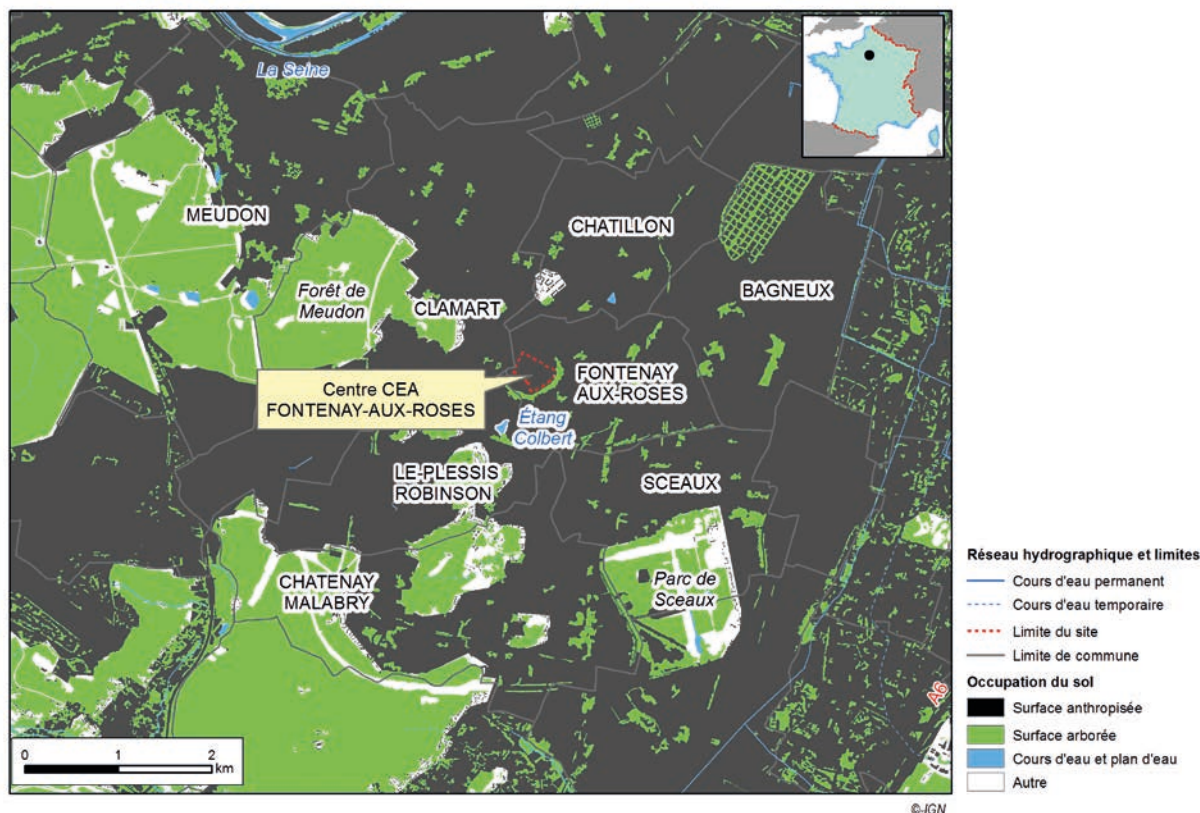
Le site de Fontenay-aux-Roses (figure 1), est implanté sur le plateau de Fontenay-aux-Roses en zone urbaine, au sud/sud-ouest de Paris (figure 2). Depuis 2007, les installations nucléaires de base (INB 165 et

INB 166) du site sont en arrêt définitif. Le programme d'assainissement des laboratoires et des installations nucléaires a été initié dès 1999. Les installations nucléaires laissent ainsi la place au développement d'activités situées exclusivement dans le domaine des sciences du vivant.

FIGURE 1 / SITE CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES



FIGURE 2 / LOCALISATION DU SITE DU CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES



Les rejets radioactifs

Les aérosols produits à l'intérieur des INB sont filtrés par deux barrières de filtres THE (très haute efficacité) avant rejet dans l'environnement. Les émissaires sont équipés de dispositifs de mesure de la radioactivité des effluents gazeux. Les effluents rejetés sont constitués potentiellement d'aérosols, de gaz rares et de traces d'halogènes.

La surveillance des effluents radioactifs gazeux des INB est assurée par des dispositifs de mesure en continu de la radioactivité, placés dans les cheminées, après les filtres THE, dernière barrière de filtration avant rejet dans l'environnement. Ils assurent en temps réel la détermination de l'activité des aérosols émetteurs bêta et de l'activité des gaz radioactifs. Neuf émissaires sont équipés de moniteurs de contrôle en temps réel de l'activité des aérosols émetteurs bêta, dont cinq contrôlent également les aérosols émetteurs alpha. Quatre d'entre eux sont équipés d'un contrôle pour la mesure en continu des gaz radioactifs.

Pour les gaz rares, les résultats de mesure issus de ces moniteurs de contrôle sont tous inférieurs aux limites de détection. L'activité totale « halogènes + aérosols » bêta rejetée reste inférieure ou égale à 0,002 GBq depuis 2015 (figure 3).

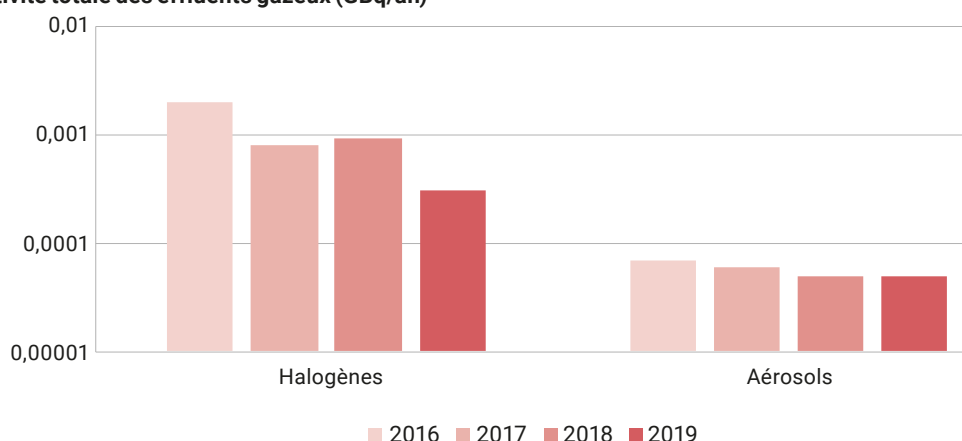
Les liquides contenant des substances radioactives sont collectés dans des cuves puis évacués vers une filière nucléaire. Les autres effluents sont recueillis dans des cuves tampons, puis transférés vers l'égout urbain après autorisation et vérification de leur conformité avec la réglementation en vigueur (activité volumique, activité totale rejetée, conformité chimique 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.

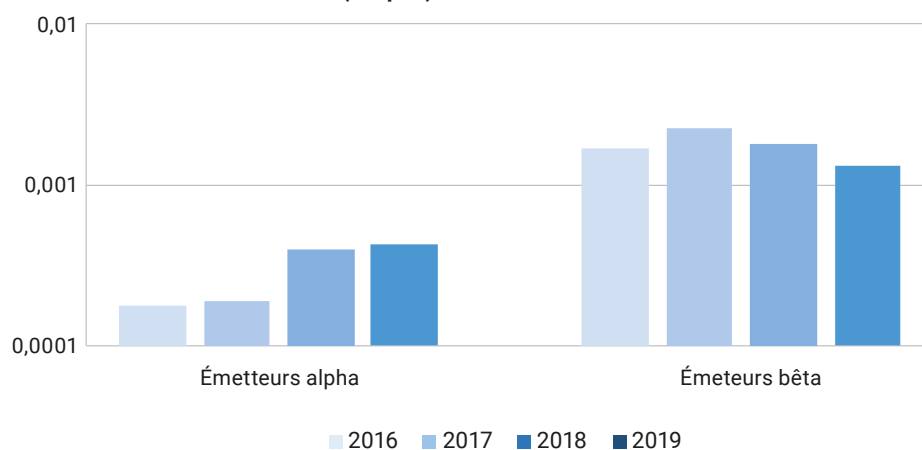
La surveillance radiologique des transferts d'effluents liquides (figure 3) porte sur les émetteurs alpha (mesure globale), les émetteurs bêta-gamma (mesure globale) et le tritium.

FIGURE 3 / REJETS GAZEUX ET LIQUIDES DES INSTALLATIONS DU SITE DE FONTENAY-AUX-ROSES SUR LA PÉRIODE 2016-2019

Activité totale des effluents gazeux (GBq/an)



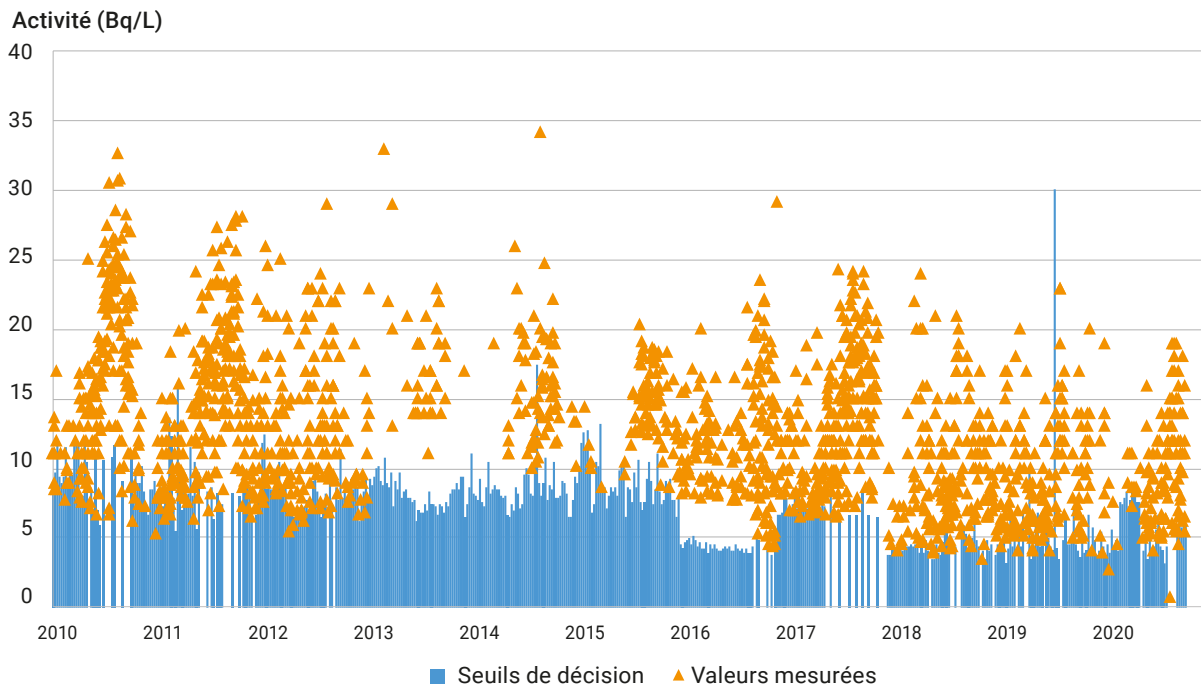
Activité totale des transferts d'effluents (GBq/an)



Les activités volumiques en tritium mesurées dans les émissaires de transfert d'effluents liquides du site dépassent régulièrement 10 Bq/L sans toutefois être imputables aux rejets du site (figure 4). En effet, des

activités du même ordre sont mesurées dans l'eau de la Seine qui approvisionne le centre de Fontenay-aux-Roses. Ces activités sont plutôt liées aux rejets de la centrale EDF de Nogent.

FIGURE 4 / ACTIVITÉS EN TRITIUM DANS LES EAUX PRÉLEVÉES PAR HYDROCOLLECTEUR DANS L'ÉGOUT URBAIN DU CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES ENTRE 2010 ET 2020 (en Bq/L) (données CEA)



Changement d'un filtre de prélèvement d'aérosols atmosphériques

© G. Lesénéchal/CEA

La surveillance radiologique de l'environnement du site

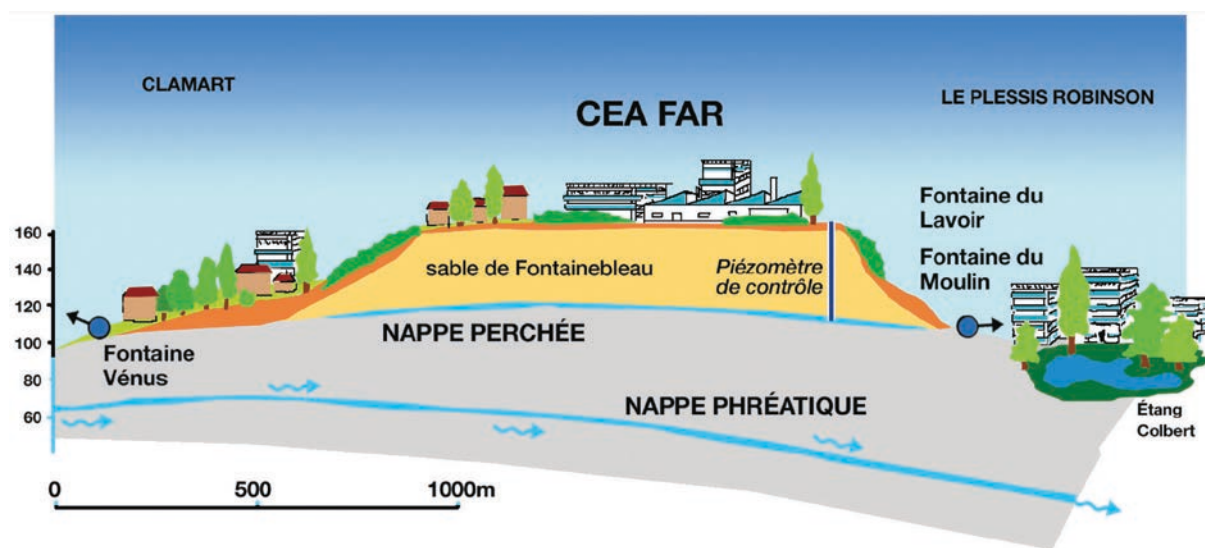
Le CEA effectue près de 6 000 mesures par an d'échantillons issus de tous les compartiments de l'environnement (air, eau, sol). La surveillance atmosphérique est réalisée à partir de mesures effectuées dans quatre stations fixes (FAR Atmos, FAR 2, Clamart et Bagneux), situées à des distances allant de 0,2 à 2 km autour du centre. La surveillance de l'air comprend le suivi des activités alpha et bêta mesurées sur les poussières atmosphériques collectées sur filtres, la recherche d'halogènes sur les cartouches de prélèvement, la mesure de l'irradiation ambiante et la mesure du tritium gazeux.

Les eaux (eaux de pluie, eaux souterraines et de surface) font également l'objet d'une surveillance radiologique réalisée à partir de mesures dans l'environnement du centre. Les eaux de pluie collectées au moyen de pluviomètres (2 pluviomètres de 1 m² et 2 pluviomètres de 0,04 m² de surface de collecte) font l'objet de mesures alpha et bêta globales ainsi que du tritium.

La nappe perchée, située à 65 mètres de profondeur au-dessus de la nappe phréatique générale (figure 5), est surveillée mensuellement par l'analyse en laboratoire de prélèvements effectués dans six forages (piézomètres). Deux points de résurgence de la nappe perchée, la fontaine du Lavoir et la fontaine du Moulin à Fontenay-aux-Roses, font l'objet d'un contrôle mensuel. La surveillance des eaux de surface se fait par des prélèvements périodiques d'eaux et de sédiments de l'étang Colbert situé à proximité du centre. L'IRSN assure également des prélèvements semestriels pour analyse sur ces deux fontaines et dans l'étang.

Des échantillons de sédiments, de sols et de végétaux sont prélevés pour suivre et déterminer l'impact des rejets sur l'environnement du CEA de Fontenay-aux-Roses (prélèvements mensuels de végétaux en quatre points situés dans les stations de surveillance extérieures au site, prélèvements annuels d'échantillons de sol, en surface, sur le site et dans les quatre stations de surveillance extérieures au site).

FIGURE 5 / SCHÉMA DE COUPE EN SOUS-SOL SOUS LE SITE CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES (source CEA)



Influence du site CEA de Fontenay-aux-Roses sur l'environnement

Parmi les radionucléides recherchés sous forme gazeuse dans l'atmosphère (iode-131, tritium), aucune mesure ne présente de résultat supérieur au seuil de décision (soit 2 mBq/m³ pour l'iode-131 et 0,25 Bq/ m³ pour le tritium).

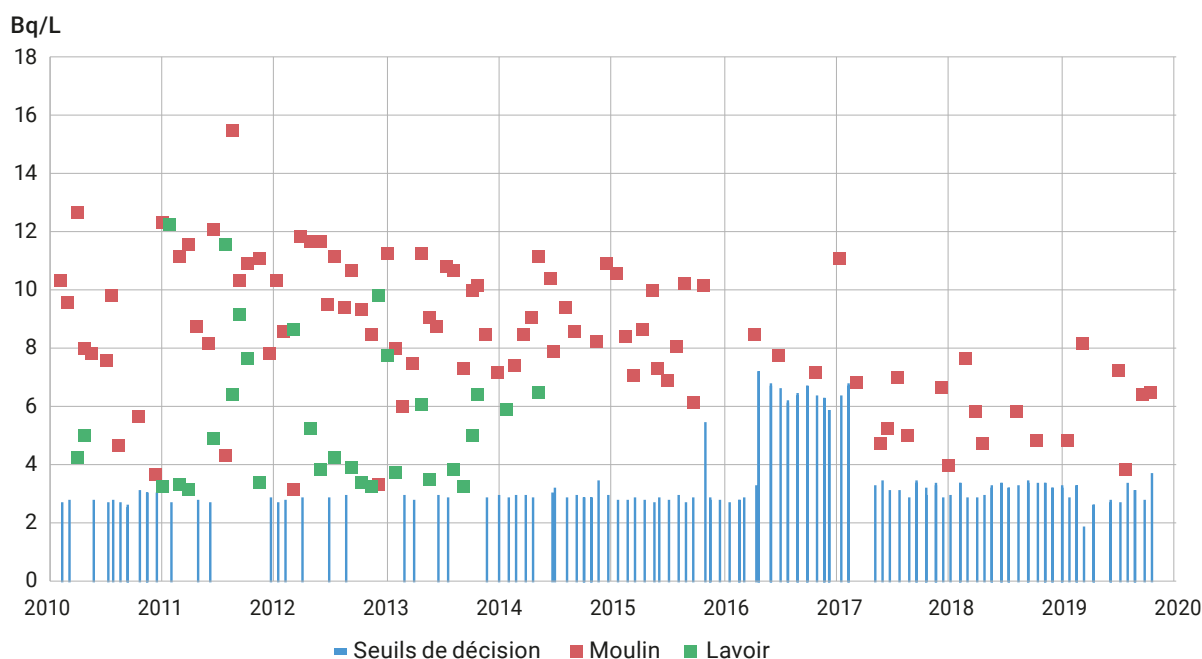
L'analyse des radionucléides des eaux de l'étang Colbert ne met en évidence aucun radionucléide d'origine artificielle. Depuis 2014, le tritium n'est plus détecté au-delà des seuils de décision métrologique (soit 5 Bq/L).

Les activités volumiques de tritium des eaux prélevées à dans la Fontaine du Moulin sont en baisse régulière depuis 2010 et sont comprises entre le seuil de décision métrologique (3 à 7 Bq/L) et 8 Bq/L au cours de la période 2018-2020 (figure 6). Les activités de tritium des eaux prélevées à la Fontaine du Lavoir sont toutes inférieures au seuil de décision depuis 2014.

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 naturelle (⁴⁰K, ⁷Be...), à l'exception d'un échantillon dont l'activité de césium-137 mesurée en novembre 2019, présente une activité massique de 0,49 Bq/kg sec qui se situe tout à fait dans la gamme du bruit de fond hérité des retombées anciennes.

Ainsi, l'ensemble des résultats de mesures radiologiques acquis autour du site du CEA de Fontenay-aux-Roses, 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 DU TRITIUM MESURÉES DANS LES EAUX SOUTERRAINES À PROXIMITÉ DU CEA DE FONTENAY-AUX-ROSES ENTRE 2010 ET 2020 (en Bq/L) ET SEUILS DE DÉCISION (SD) ASSOCIÉS (données CEA)



Centre CEA et Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble

Les centres de recherche du CEA et de l'Institut Laue-Langevin (ILL) sont situés à proximité immédiate l'un de l'autre et insérés dans l'agglomération grenobloise (Isère, 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'arrêté portant homologation de la décision de l'ASN de déclassement de l'INB 61 (LAMA) est paru le 13 octobre 2017.

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 gazeux sont classés en 5 catégories de radionucléides (gaz rares, tritium, carbone-14, iodes et aérosols). Les rejets en gaz sont quantifiés par la voie de mesure des gaz 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) et le carbone-14 avec des activités rejetées 10 fois plus faibles. En ce qui concerne les rejets d'halogènes et d'aérosols, les activités rejetées sont rarement supérieures aux seuils de décision qui sont de l'ordre de quelques millièmes de l'autorisation de rejet. Les rejets gazeux 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 1 000 fois plus importantes que celles du carbone-14 en 2013 et 2 000 fois supérieures à celles dues aux rejets d'émetteurs bêta/gamma (tableau 2).

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.

FIGURE 2 / ÉVOLUTION DES REJETS GAZEUX (gaz rares, tritium et carbone-14) DE L'ILL DEPUIS 2008

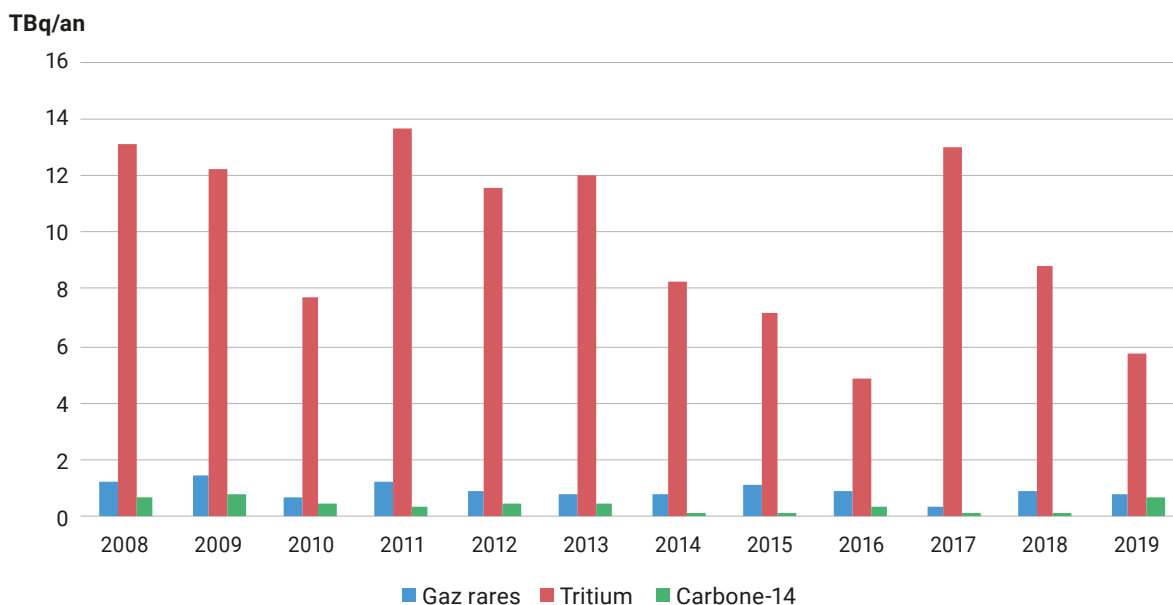


TABLEAU 1 / ÉVOLUTION DES REJETS GAZEUX (gaz rares, tritium, carbone-14) DE L'ILL DEPUIS 2008 (TBq)

Année	Gaz rares	Tritium	Carbone-14
2008	1,25	13,1	0,68
2009	1,42	12,2	0,76
2010	0,74	7,7	0,46
2011	1,2	13,7	0,41
2012	0,88	11,6	0,45
2013	0,86	12	0,46
2014	0,81	8,3	0,076
2015	1,1	7,2	0,2
2016	0,92	4,9	0,36
2017	0,42	13	0,046
2018	0,9	8,8	0,12
2019	0,76	5,8	0,66

TABLEAU 2 / ÉVOLUTION DES REJETS LIQUIDES (tritium, carbone-14 et émetteurs bêta/gamma) DE L'ILL DEPUIS 2008 (GBq)

Année	Tritium	Carbone-14	Émetteurs bêta/gamma
2008	225	0,23	0,090
2009	32	0,11	0,094
2010	240	0,21	0,096
2011	120	0,27	0,13
2012	370	0,27	0,11
2013	240	0,25	0,11
2014	180	0,22	0,051
2015	43	0,10	0,033
2016	38	0,22	0,22
2017	189	0,29	0,139
2018	140	0,21	0,024
2019	54	0,13	0,047

La surveillance radiologique de l'environnement du site

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

Deux types de surveillance sont assurés par l'ILL :

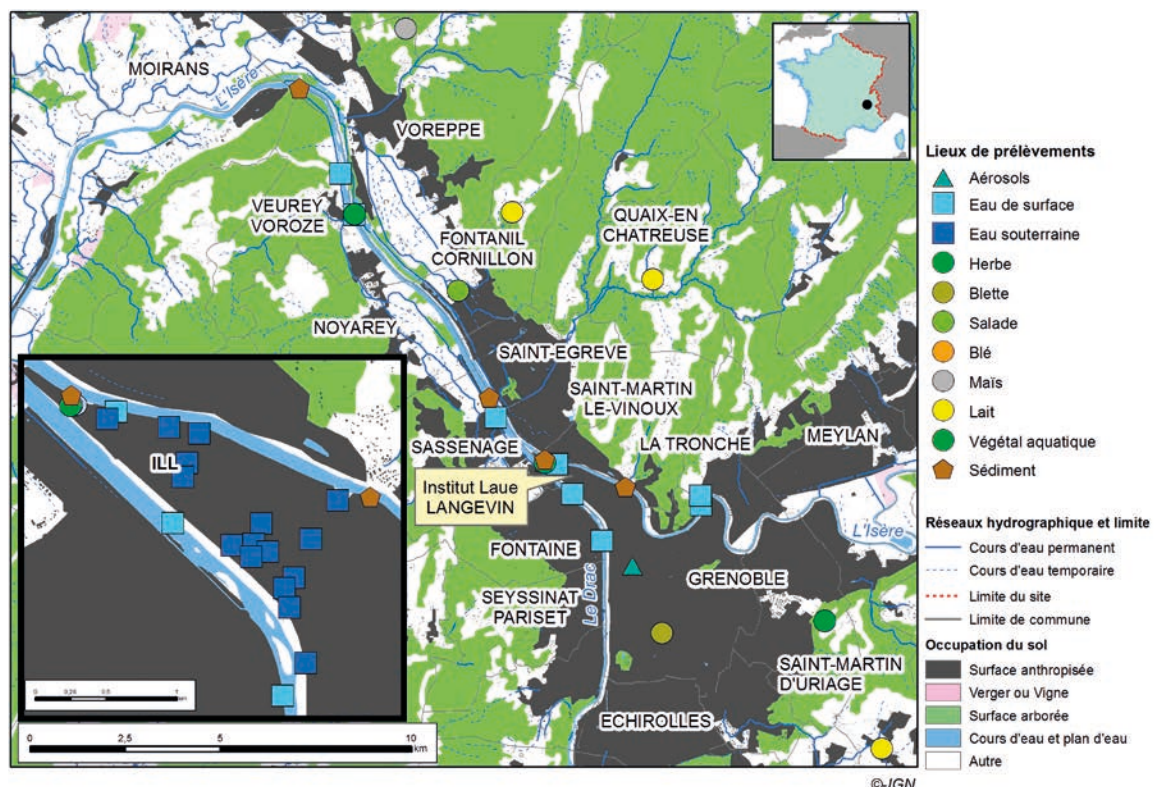
- une surveillance en continu, au moyen de stations situées en différents points de l'agglomération. Deux au nord : au pied du pylône météo à la pointe de la presqu'île, et plus loin vers le nord-ouest, à la Rollandière, et deux au sud : sur le toit de la piscine Chorier-Berriat et au Mûrier, au-dessus de 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 bio-indicateurs 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 ;
- des mesures en continu ou en différé (dosimétrie ambiante par dosimétrie passive et active). Ainsi près de 1 800 mesures en continu et en différé sont exploitées par an.

L'objectif est de s'assurer de l'absence d'impact radiologique sur l'environnement et la chaîne alimentaire dans la cuvette grenobloise.

FIGURE 3 / LOCALISATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENTS AUTOUR DE L'ILL (prélèvements CEA et IRSN)



Influence des rejets du site (ILL seulement) 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. Le CEA de Grenoble ne procède plus à des rejets de tritium, que ce soit sous forme liquide depuis février 2009 ou gazeuse depuis juillet 2013.

La surveillance du tritium dans l'air est réalisée toutes les semaines à l'aide de barboteurs implantés sous les vents dominants : au sud-est du site (station « extérieure ») et au nord-ouest (station « pylône » située à la confluence du Drac et de l'Isère). Les valeurs sont le plus souvent inférieures au seuil de décision. Néanmoins, sur la période 2018-2020, le tritium reste détectable ponctuellement sous forme de vapeur d'eau tritiée (HTO, entre 0,05 et 1,38 Bq/m³, figure 4) ou sous forme de gaz tritié (entre 0,08 et 2,62 Bq/m³, figure 5). Lorsque le tritium sous forme HTO est mesuré, ses activités dans l'air sont supérieures au bruit de fond radiologique (qui est d'environ 0,01 Bq/m³) et témoignent d'une nette influence du fonctionnement de l'ILL. Il en est de même du tritium sous forme HT qui provient essentiellement de l'ILL.

En complément des prélèvements réalisés par l'exploitant, l'IRSN dispose aussi d'un barboteur tritium depuis fin 2014. 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. Contrairement à la période 2015-2017, le nombre de mesures du tritium (sous forme HTO ou HT) supérieures aux seuils de décision au cours de la période 2018-2020 ne permet pas de calculer la moyenne des activités pour la période entière. Cependant, à titre de comparaison, la moyenne de l'activité de la vapeur d'eau tritiée a été calculée uniquement pour l'année 2018, à partir des données acquises par l'IRSN. Cette moyenne s'établit à 0,14 Bq/m³, soit légèrement inférieure à la moyenne mesurée pour l'année 2017 (0,18 Bq/m³).

Avant 2015, le tritium de l'air était mesuré sans distinction des formes chimiques (tritium total). Ces anciennes données sont accessibles dans le précédent *Bilan radiologique* (figure 4 p. 220).

FIGURE 4 / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS EN TRITIUM LIBRE (HTO) MESURÉES DANS L'AIR À PROXIMITÉ DE L'ILL (Bq/m³) ENTRE 2015 ET 2020 - DONNÉES ILL ET IRSN

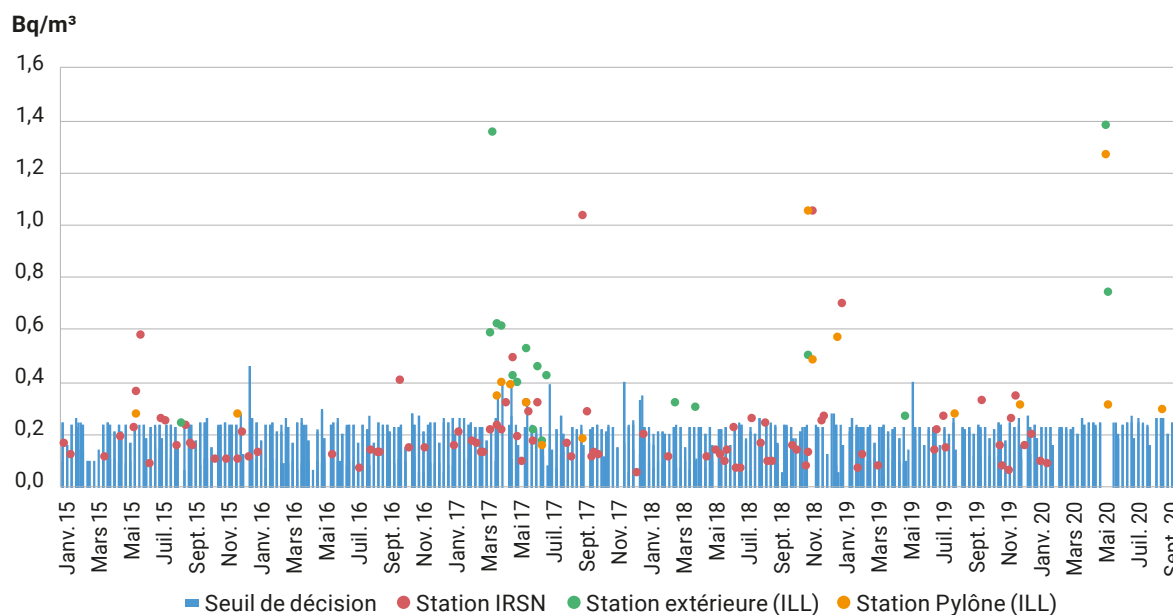
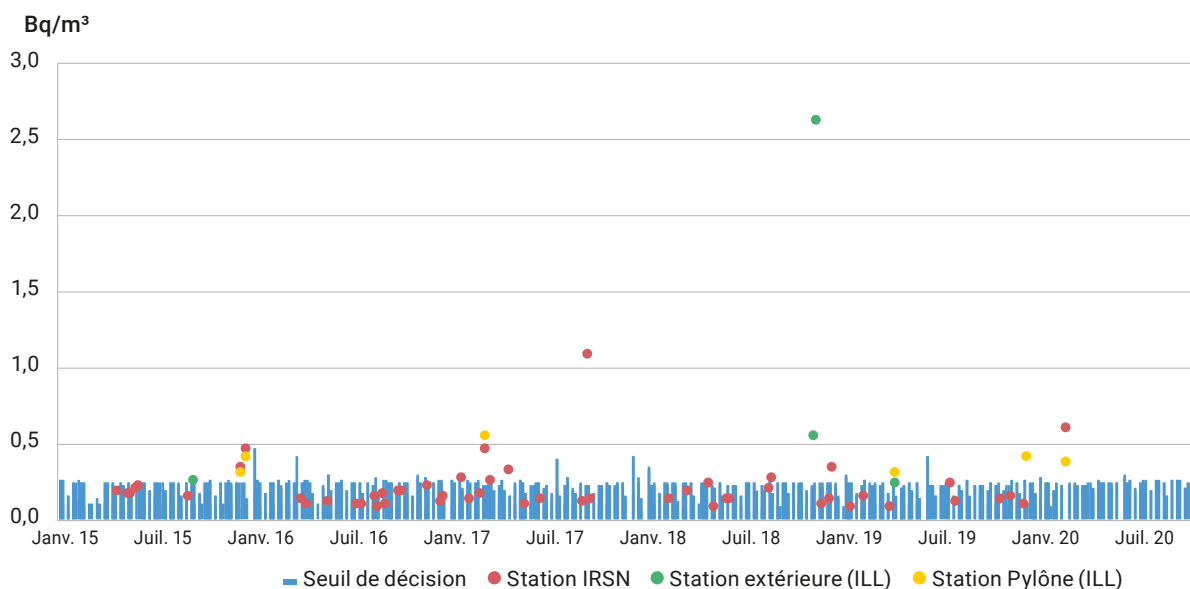


FIGURE 5 / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DE TRITIUM GAZEUX (HT) MESURÉES DANS L'AIR À PROXIMITÉ DE L'ILL (Bq/m³) ENTRE 2015 ET 2020 (données ILL et IRSN)



Le tritium est également mesuré à fréquence hebdomadaire dans les eaux de pluie prélevées à proximité de l'ILL (figure 6). Sur la période 2018-2020, le tritium est plus fréquemment détecté dans l'eau de pluie à la station nord-ouest (65 % des cas) qu'à la station sud-est (50 % des cas). La plus grande proximité de la station nord-ouest ainsi que la direction des vents dominants de sud-sud-ouest sur le secteur de l'ILL permettent d'expliquer cette meilleure fréquence de mesure. En revanche, l'activité maximale de 95 Bq/L d'eau de pluie a été mesurée à la station sud-est en juin 2020 tandis que la station nord-ouest enregistrait une activité de 56 Bq/L. Ceci 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. 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 près de 80 % des cas. Les activités mesurées y sont en revanche un peu inférieures, sans doute liées à la fréquence de mesure qui est mensuelle.

Les activités moyennes du tritium dans l'eau de pluie à ces 3 stations sont très proches (entre 4,8 et 5,7 Bq/L) entre 2018 et 2020, et environ 4 à 5 fois supérieures au bruit de fond radiologique (de l'ordre de 1 Bq/L dans une gamme allant de 0,4 à 2 Bq/L sur cette même période). Comme pour les activités mesurées dans l'air, elles témoignent de l'influence des rejets de l'ILL dans l'environnement.

En ce qui concerne les cours d'eau, sur la période 2018-2020, le tritium n'a pas été détecté aux stations suivies par l'ILL et seulement à 9 reprises aux stations suivies par l'IRSN (figure 7). Bien que supérieure à la gamme du bruit de fond radiologique du tritium dans l'environnement (de l'ordre de 1 Bq/L dans une gamme allant de 0,4 à 2 Bq/L pour la période étudiée), la contribution des rejets de l'ILL à ces activités mesurées ne peut être quantifiée en raison des incertitudes météorologiques (en moyenne de 74 %). Il en est de même dans les eaux de nappes où l'essentiel des résultats de mesures ne peut être distingué du bruit de fond radiologique, à l'exception de quatre valeurs acquises en 2019 sur les piézomètres localisés à l'ILL, qui témoignent de l'influence du fonctionnement de l'installation (figure 8).

FIGURE 6 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE À PROXIMITÉ DU CENTRE ILL (Bq/L)
ENTRE JANVIER 2010 ET OCTOBRE 2020 (données ILL et IRSN)

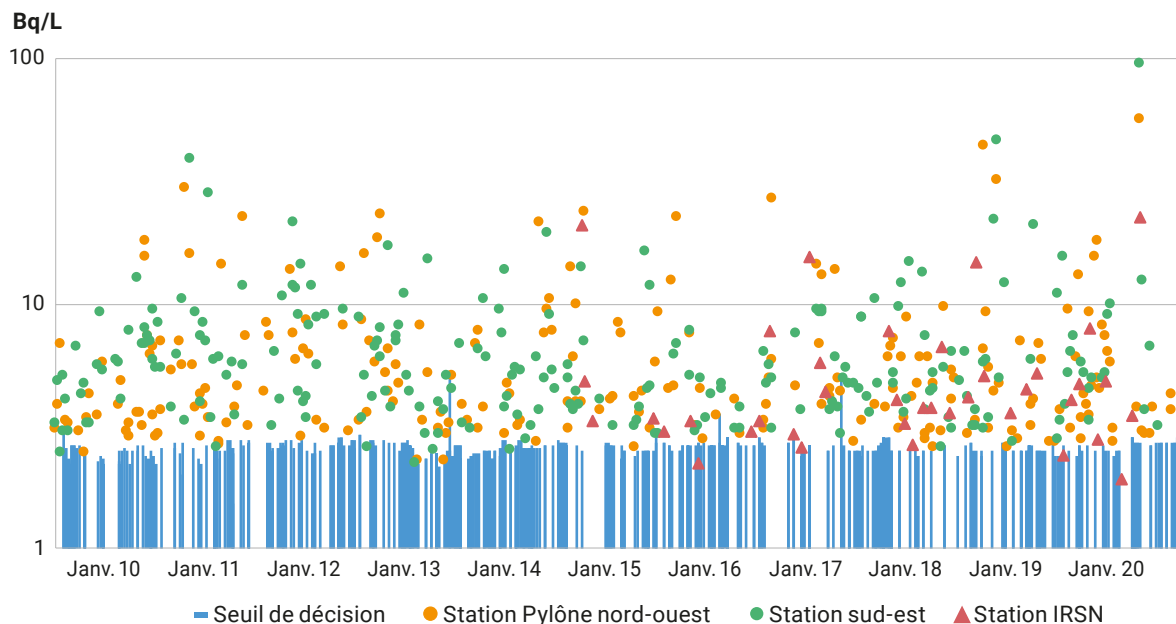


FIGURE 7 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'ISÈRE ET LE DRAC (Bq/L),
ENTRE JANVIER 2010 ET JUIN 2020 (données IRSN)

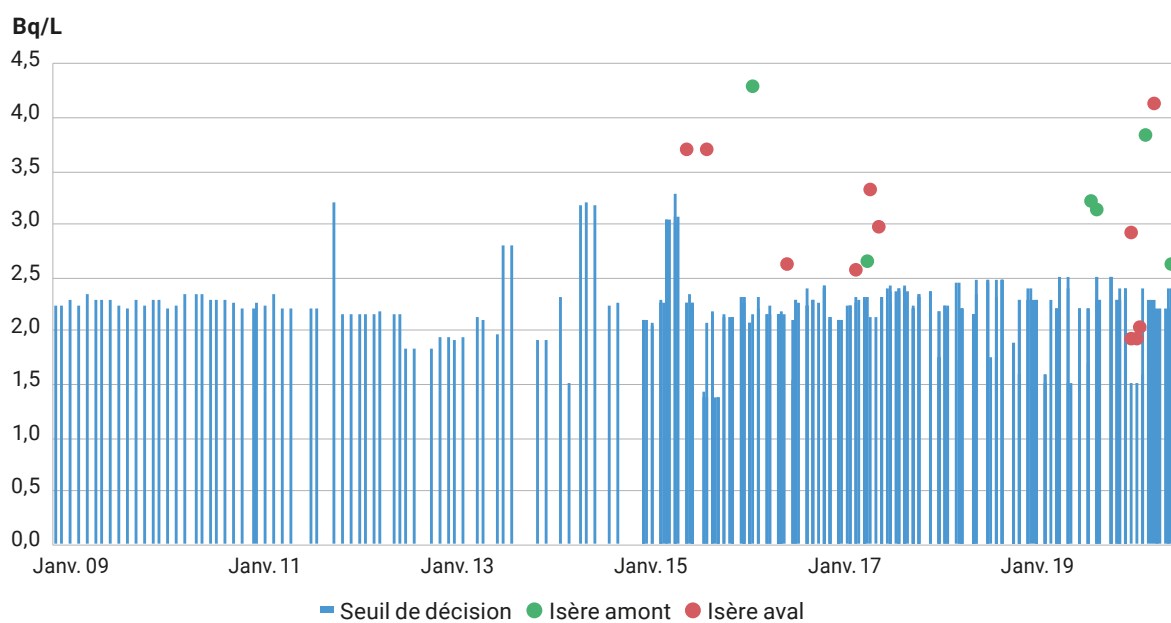
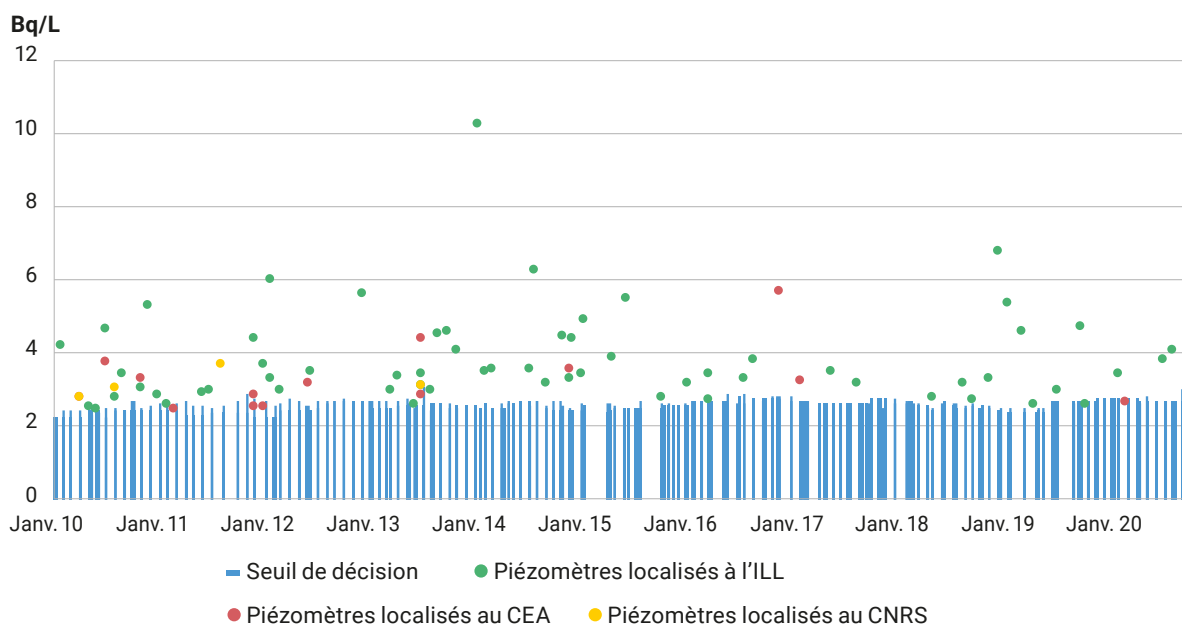


FIGURE 8 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'EAU SOUTERRAINE PRÉLEVÉE DANS LES PIÉZOMÈTRES SITUÉS SUR LE CENTRE ILL OU À PROXIMITÉ (Bq/L) ENTRE JANVIER 2010 ET OCTOBRE 2020



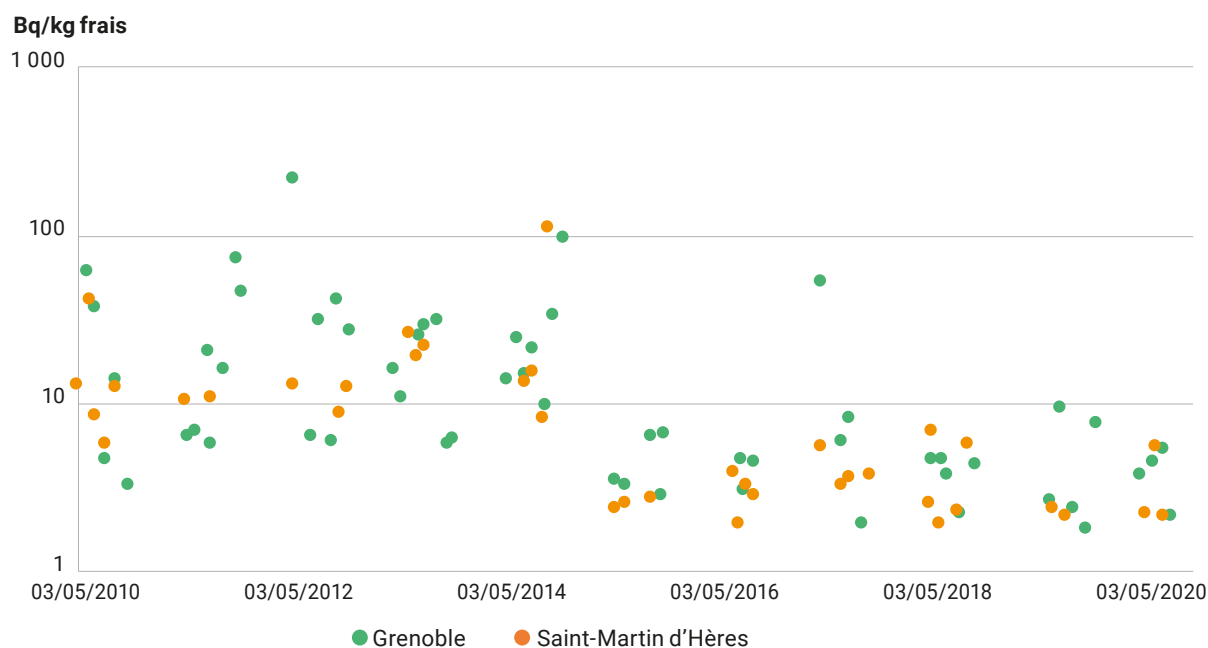
Notons que les prélèvements d'eau effectués au niveau des piézomètres localisés autour de l'ESRF (accélérateur européen) depuis 2018, n'ont pas permis de mesurer le tritium dans la nappe sous-jacente.

Les prélèvements mensuels d'herbe sont réalisés de mai à novembre. Ce type de prélèvement représente un indicateur de choix pour le marquage de l'environnement terrestre du fait du caractère intégrateur des végétaux. Sur la période 2018-2020, le tritium est moins fréquemment détecté qu'au cours de la période précédente (entre 60 et 70 % contre 80 à 90 % entre 2015 et 2017 ; figure 9). Les activités en tritium mesurée entre 2018 et 2020 varient entre 1,8 et 9,3 Bq/kg frais à Grenoble (moyenne de 3,5 Bq/kg frais) et entre 1,6 et 6,9 Bq/kg frais (moyenne de 2,7 Bq/kg frais) sur la commune de Saint-Martin-d'Hères.

Les mesures acquises à Grenoble par l'IRSN à fréquence annuelle (depuis 2015) sont semblables aux activités mesurées par l'ILL (3,2 à 9,4 Bq/kg frais). Les plus élevées d'entre elles témoignent de l'influence des rejets tritiés de l'ILL.

Dans les productions agricoles prélevées par l'IRSN et l'ILL à fréquence annuelle (blettes, salades, maïs, blé), les résultats obtenus s'inscrivent dans la gamme de mesure du tritium dans l'herbe. Les résultats acquis sur ces productions ne permettent pas de mettre en évidence une influence des rejets tritiés de l'ILL au cours de la période 2018-2020.

FIGURE 9 / ACTIVITÉS MASSIQUES DU TRITIUM DANS L'HERBE DE PRAIRIE PRÉLEVÉE À GRENOBLE ET À SAINT-MARTIN-D'HÈRES (Bq/kg frais) ENTRE JANVIER 2010 ET OCTOBRE 2020



L'activité en carbone-14 mesurée dans l'herbe prélevée à Saint-Martin-d'Hères et sur le site de l'ILL chaque année, varie de 28,9 à 109 Bq/kg sec entre 2018 et 2020. Ces valeurs sont proches de celles mesurées en 2015 et 2017 (14 à 109 Bq/kg sec) et ne permettent pas de conclure sur l'influence du site sur son environnement.

En milieu aquatique, les analyses réalisées sur les poissons, sédiments et végétaux aquatiques présentent des activités en 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.

Évaluation dosimétrique

Sur la base de l'activité moyenne en tritium de l'air calculée pour l'année 2018 par l'IRSN (0,14 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 0,038 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 0,033 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 0,071 µSv/an. Cette évaluation est très proche de celle réalisée par l'ILL sur la base de ses rejets gazeux de 2019 : 0,089 µSv/an. Elle est également très proche de l'estimation fournie dans le précédent bilan radiologique pour la période 2015-2017 (0,084 µSv/an).

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 faibles activités, 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. La plupart des 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 notamment) exploitée par la société CISBIO IOASSAYS 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, Phenix, Centraco et Melox) et chaque installation a sa propre autorisation de rejets.

Les rejets liquides et gazeux 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

FIGURE 1 / LOCALISATION DES POINTS DE SURVEILLANCE CEA (à gauche) ET IRSN (à droite) AUTOUR DU SITE DE MARCOULE

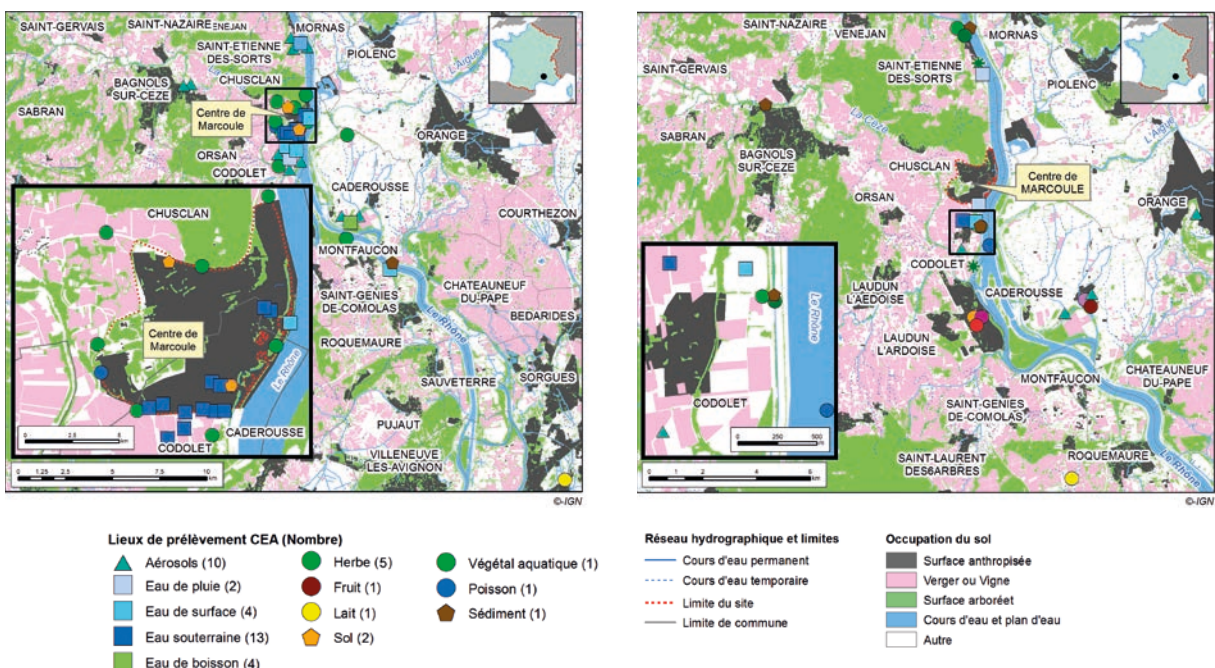


TABLEAU 1 / RÉPARTITION DES REJETS DE 2017, 2018 ET 2019 ENTRE LES DIFFÉRENTES INSTALLATIONS

Effluents gazeux des INB du CEA Marcoule (PHENIX et ATALANTE)	2017	2018	2019
Aérosols bêta gamma (MBq)	9,5	9,6	11,1
Aérosols alpha (MBq)	0,15	0,19	0,29
Tritium (GBq)	28,9	38,8	24,6
Halogènes (MBq)	14,3	19,1	19,1
Gaz hors tritium (TBq)	50,9	49	46,7
¹⁴ C (GBq)	0,25	0,08	0,17

Effluents gazeux tritiés de l'INBS (TBq)	2017	2018	2019
	24	20	27

Effluents liquides (INBS) de 2017 à 2019*	2017	2018	2019
Émetteurs alpha (GBq)	2,77	2,02	1,20
Carbone-14 (GBq)	1,96	1,53	1,16
Iodes (GBq)	0,39	0,28	0,44
Tritium (TBq)	2,32	0,68	1,55
Autres émetteurs bêta gamma (GBq)	113	52,5	38,3

* 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).

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.

FIGURE 2 / ÉVOLUTION DES REJETS TRITIÉS ATMOSPHÉRIQUES

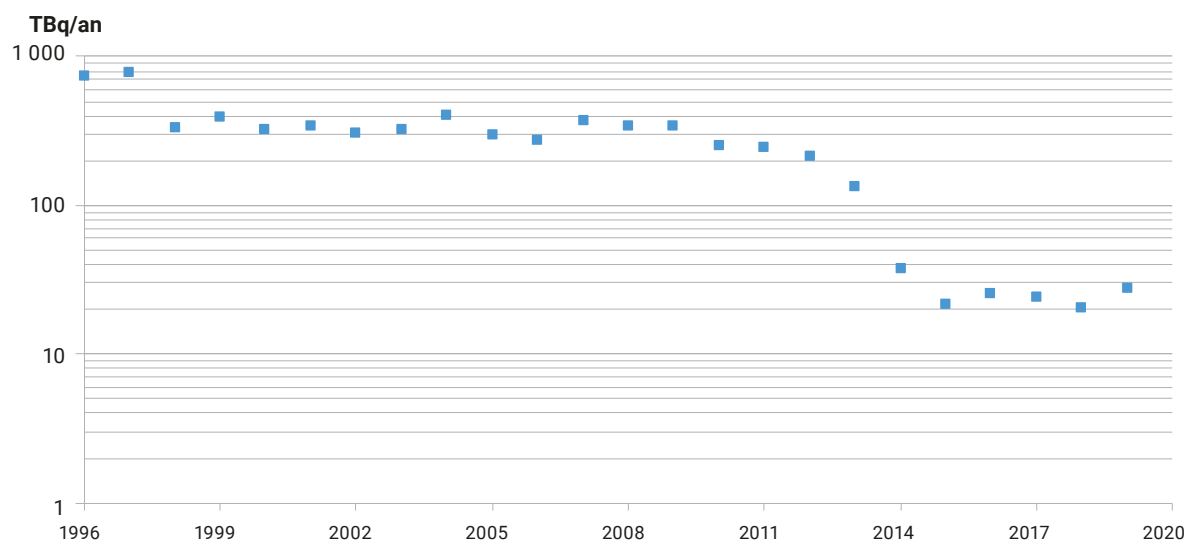


TABLEAU 2 / PLANS DE SURVEILLANCE CEA (jusqu'en 2019) ET IRSN DU SITE DE MARCOULE

Milieu surveillé ou nature du contrôle	CEA	IRSN
Rayonnement γ ambiant	4 balises dans l'environnement à St-Étienne-des-Sorts, Bagnols-sur-Cèze, Codolet et Caderousse : débit de dose γ ambiant 11 dosimètres passifs à la clôture du site	2 balises dans l'environnement à Bagnols-sur-Cèze et Orange : débit de dose γ ambiant
Aérosols atmosphériques	4 points de prélèvements à St-Étienne-des-Sorts, Bagnols-sur-Cèze, Codolet et Caderousse : activités α et β globales (quotidien), spectrométrie γ si α et β global > 2 mBq/m ³ et spectrométries α et γ sur regroupement mensuel des filtres quotidiens	1 point de prélèvements à Codolet : spectrométrie γ (hebdomadaire) et spectrométrie α (mensuel)
Tritium, carbone-14 et iode-129 dans l'air	2 points de prélèvements à St-Étienne-des-Sorts et Codolet : tritium dans l'air HTO - HT, ¹²⁹ I et ¹⁴ C (4 périodes par mois suivant planning annuel)	
Eau de pluie	2 points de prélèvements à Codolet et Saint-Étienne-des-Sorts : activités α et β globales, tritium (bimensuel)	1 point de prélèvements à Codolet : spectrométrie γ et tritium (mensuel)
Eaux souterraines	6 points de prélèvements en clôture du site : activités α et β globales, tritium (mensuel ou trimestriel) 7 points de prélèvements dans la plaine de Codolet : activités α et β globales, tritium (mensuel ou trimestriel) et ⁹⁰ Sr (annuel sur 1 point)	1 point de prélèvements à Codolet : spectrométrie γ, tritium, uranium isotopique, spectrométrie α et ⁹⁰ Sr (semestriel)
Eau de surface	2 points de prélèvements 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 (hebdomadaire) spectrométrie γ sur le point aval (mensuel) 1 point de prélèvements dans le contre-canal en aval du site : activités α et β globales, tritium (mensuelle) 1 point de prélèvements dans l'Étang de Codolet : activités α et β globales, tritium, spectrométrie α (mensuel)	1 point de prélèvements dans l'Étang de Codolet : spectrométrie γ, tritium et ⁹⁰ Sr (semestriel)
Sédiments	1 point de prélèvements en aval du site : spectrométrie γ et spectrométrie α (annuel)	2 points de prélèvements en amont et en aval du site : spectrométrie γ, spectrométrie α, ⁹⁰ Sr (semestriel)
Poissons	1 point de prélèvements en aval du site : spectrométrie γ, HTO, TOL et ¹⁴ C (annuel)	1 point de prélèvements en aval du site : spectrométrie γ, spectrométrie α, ⁹⁰ Sr (annuel)
Mollusques	1 point de prélèvements en aval du site : spectrométrie γ, HTO, TOL et ¹⁴ C (annuel)	
Végétaux aquatiques	1 point de prélèvements en aval du site : spectrométrie γ, ¹⁴ C et HTO (annuel)	2 points de prélèvements en amont et en aval du site : spectrométrie γ, tritium organiquement lié, spectrométrie α et ⁹⁰ Sr (semestriel)
Sols	2 points de prélèvements au nord et au sud du site : spectrométrie γ (annuel)	
Herbe	5 points de prélèvements autour du site : spectrométrie γ (mensuel), HTO et TOL (annuel sur 2 points), spectrométrie α (mensuel sur 2 points), ¹⁴ C (trimestriel sur 2 points), comptage β (mensuel sur 4 points)	2 points de prélèvements à St-Étienne-des-Sorts et Codolet : spectrométrie γ, tritium libre et organiquement lié, spectrométrie α, ⁹⁰ Sr (annuel)
Feuilles d'arbre		3 points de prélèvements à St-Étienne-des-Sorts, Codolet et Caderousse : tritium libre et organiquement lié (annuel)
Légumes et fruits	Campagne annuelle sur les principales productions notamment au sud du site : spectrométrie γ, ⁹⁰ Sr, ¹⁴ C (annuel), HTO et TOL (annuel sur 1 fruit et 1 légume)	1 point de prélèvements de légume-feuille au sud-ouest du site : spectrométrie γ, tritium libre et organiquement lié (annuel) 1 point de prélèvements de légume-racinaire au sud-est du site : spectrométrie γ, spectrométrie α (annuel) 1 point de prélèvements au sud-est du site : spectrométrie γ, tritium libre et organiquement lié (annuel)
Blé		1 point de prélèvements au sud du site : spectrométrie γ, tritium organiquement lié, ⁹⁰ Sr (annuel)
Vin	1 point de prélèvements : spectrométrie γ, ⁹⁰ Sr, ¹⁴ C (annuel)	
Lait	1 point de prélèvements à Saint-Laurent-des-arbres : activité β globale et spectrométrie γ (mensuel), ¹⁴ C (trimestriel), HTO, TOL et ⁹⁰ Sr (annuel)	1 point de prélèvements au sud du site : spectrométrie γ, tritium libre, ¹²⁹ I et ⁹⁰ Sr (semestriel)
Eau potable	4 points de prélèvements à Caderousse, Codolet, St-Étienne-des-Sorts et Bagnols-sur-Cèze : activité β globale, tritium et spectrométrie α (annuel)	

Influence du site de Marcoule sur son environnement

Le tritium

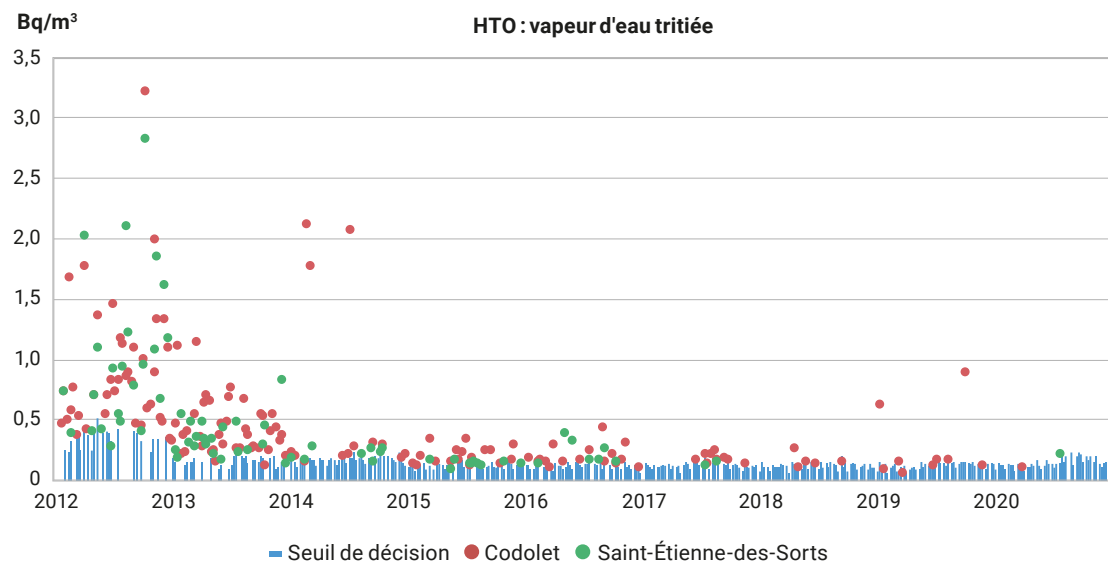
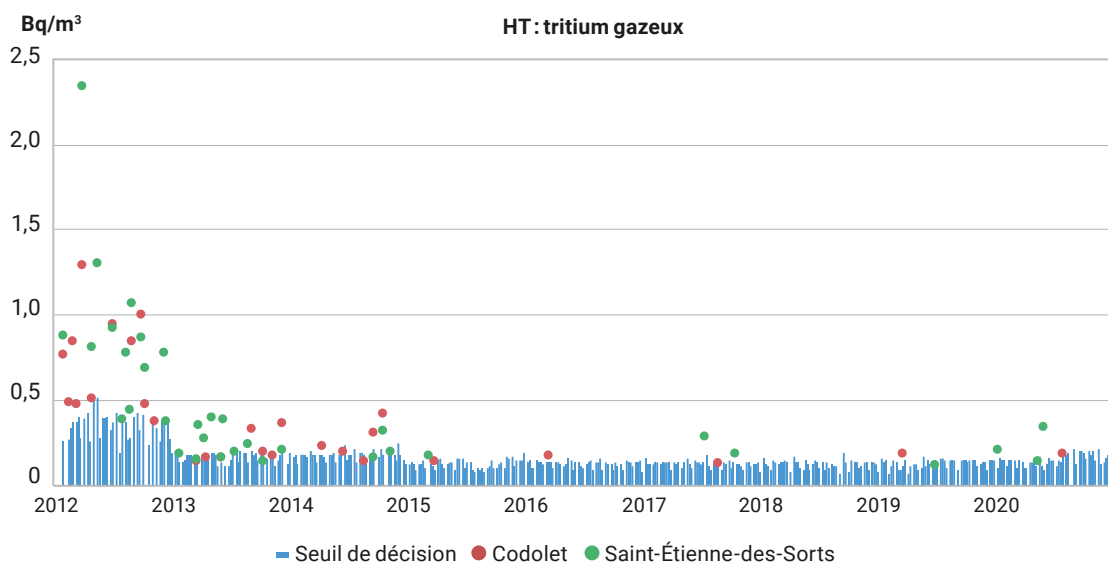
Le tritium, radionucléide prépondérant dans les rejets atmosphériques et liquides de Marcoule, est aussi le plus mesuré et le plus abondant dans les différentes composantes de l'environnement autour du site.

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 à l'aide de barboteurs, 4 fois par mois et 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 (2015-2017), la forme HTO est prépondérante. Néanmoins, 74 % des résultats de mesure de HTO acquis sur les deux stations sont inférieurs au seuil de décision. À Codolet, les activités mesurées sur la période 2018-2020 varient de 0,05 Bq/m³ à 0,88 Bq/m³ pour le tritium

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS L'AIR SOUS FORME DE VAPEUR D'EAU (HTO) ET SOUS FORME GAZ (HT et autres composés organiques gazeux tritiés) MESURÉES À FRÉQUENCE HEBDOMADAIRE DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE MARCOULE



vapeur (HTO) et de 0,16 Bq/m³ à 0,17 Bq/m³ pour le tritium gaz (HT). Sur la station de Saint-Étienne-des-Sorts, les valeurs sont du même ordre de grandeur : 0,2 Bq/m³ pour le tritium vapeur (HTO) et de 0,11 Bq/m³ à 0,34 Bq/m³ pour le tritium gaz (HT). De manière générale, cette gamme d'activités est du même ordre de grandeur que celle qui était observée sur la période précédente (2015-2017) et nettement plus faible que celle de la période encore antérieure (2011-2014) en raison de la mise à l'arrêt de l'Atelier Tritium en 2012.

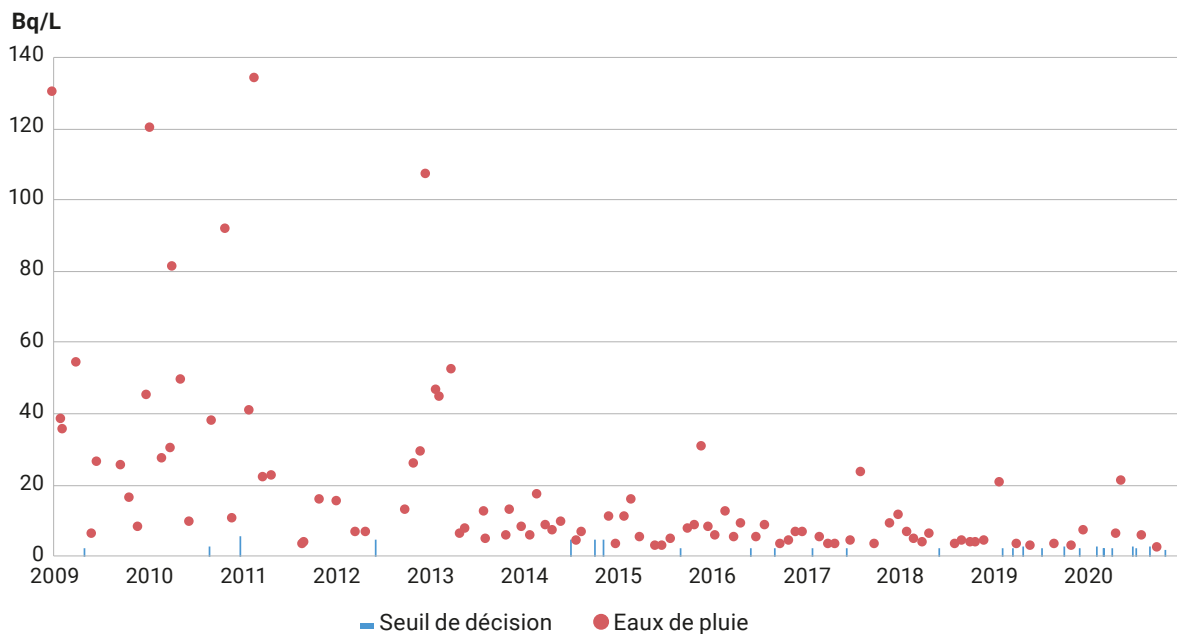
Les activités significatives en tritium de l'air aux alentours de Marcoule restent néanmoins nettement au-dessus du bruit de fond de ce radionucléide qui se situe autour de 0,01 Bq/m³ pour le tritium sous forme HTO.

De manière cohérente avec l'activité en tritium de l'air et avec la baisse des rejets, la gamme des activités mesurées en tritium dans l'eau de pluie à Codolet présente des concentrations en baisse par rapport

à la période 2015-2017. Sur la période 2018-2020, la plage des valeurs s'étend de 1,9 Bq/L mesurés en octobre 2020 à une valeur maximale de 20,7 Bq/L mesurée en mai 2020 (figure 4). Cela est à comparer avec le bruit de fond actuel qui est de 1 Bq/L dans une gamme allant de 0,4 à 2 Bq/L.

Les activités atmosphériques présentées précédemment sont à l'origine de celles mesurées dans l'herbe prélevée autour du site. En effet, le tritium dans l'eau libre contenue dans l'herbe (HTO) est le reflet de la concentration en tritium présent dans l'air quelques heures avant le prélèvement. Pour la période concernée les concentrations mesurées varient de 4,6 Bq/kg frais à 26,6 Bq/kg frais (figure 5). En revanche, la figure 6 montre que les activités en tritium du lait sont toutes inférieures au seuil de décision de 2,4 Bq/L sur la période 2018-2020. Il est donc probable que la part des fourrages d'origine très locale dans l'alimentation des animaux soit faible.

FIGURE 4 / ACTIVITÉS DU TRITIUM MESURÉES DANS LES EAUX DE PLUIE (Bq/L)



Pour la période 2018-2020, les activités en tritium libre mesurées respectivement dans les fruits et le vin sont toutes inférieures aux seuils de décision de 5,2 Bq/kg frais (figure 7) et de 4,3 Bq/L respectivement.

Enfin, les activités en tritium organiquement lié des feuilles d'arbres prélevées sur les communes de Caderousse et Codolet, présentent une grande gamme de variabilité (5 à 20 Bq/kg sec pour les prélèvements effectués en 2018 et 2019) en bonne concordance avec celles de l'herbe, de la vapeur d'eau atmosphérique et de l'eau de pluie.

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 8). Sur la période 2018-2020, la mesure la plus élevée a été observée en janvier 2018 sur le piézomètre F215 avec une valeur de 34 Bq/L. Sur la période précédente, la valeur la plus élevée correspondait également à ce piézomètre avec une valeur de 68 Bq/L.

FIGURE 7 / ACTIVITÉS EN TRITIUM LIBRE MESURÉES DANS LES ÉCHANTILLONS DE FRUITS D'ARBRES PRÉLEVÉS À PROXIMITÉ DU SITE DU CEA DE MARCOULE (Bq de tritium/kg frais)

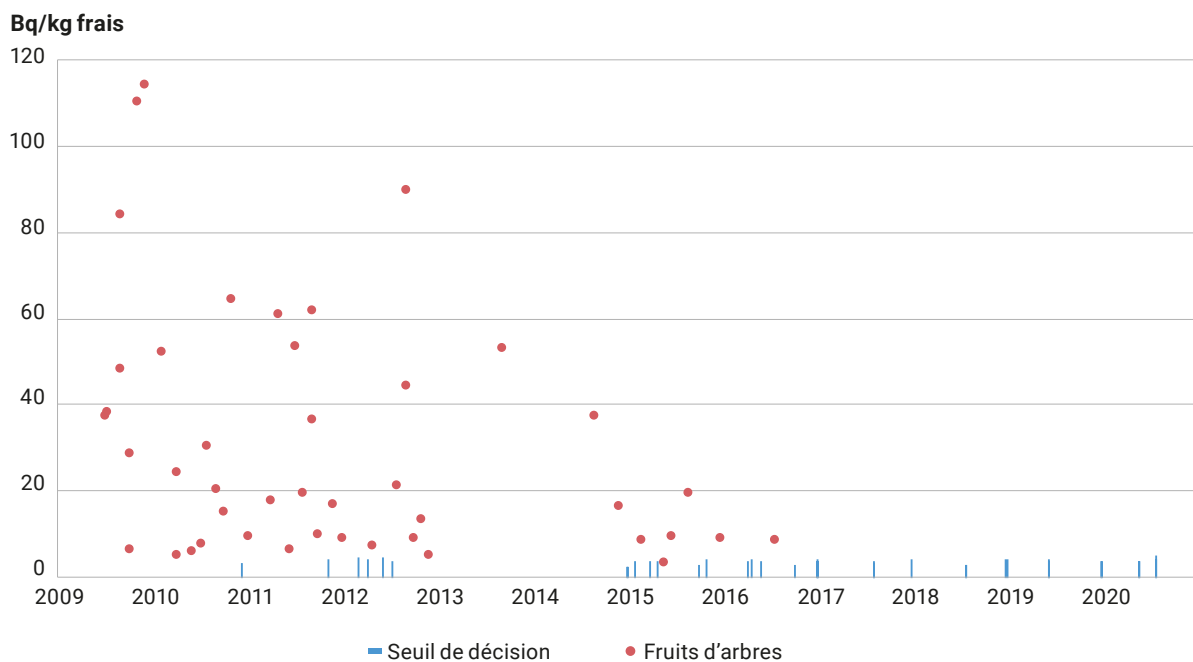
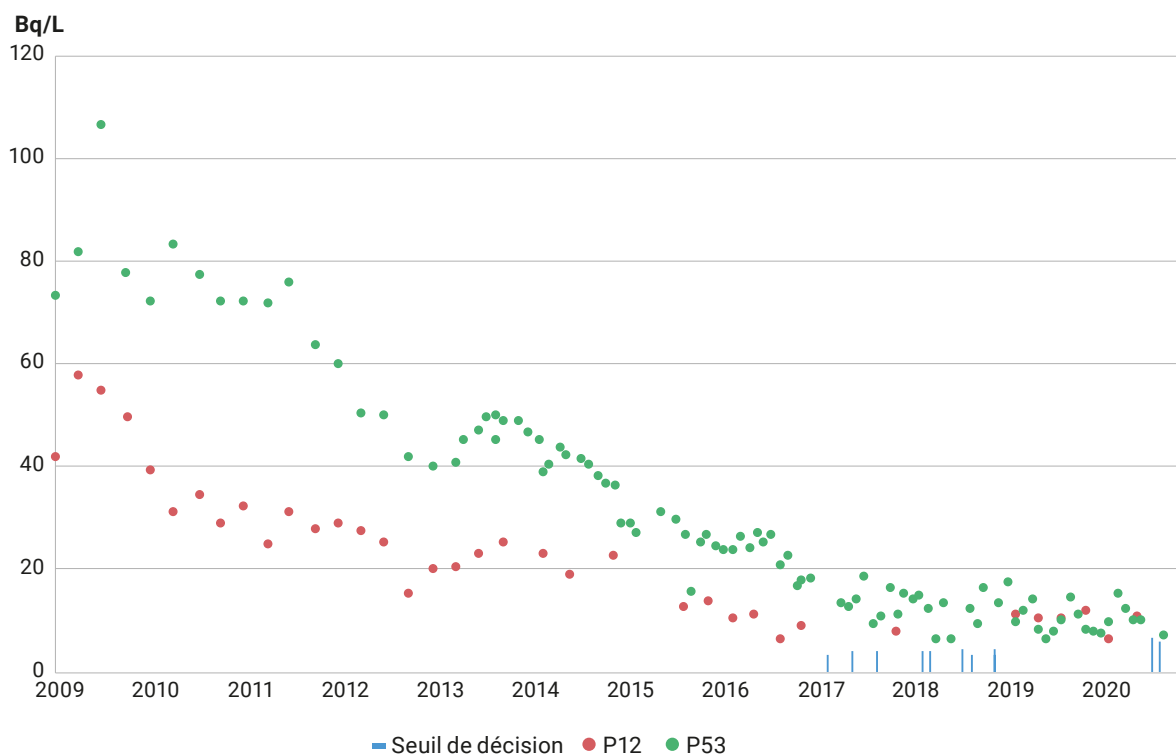
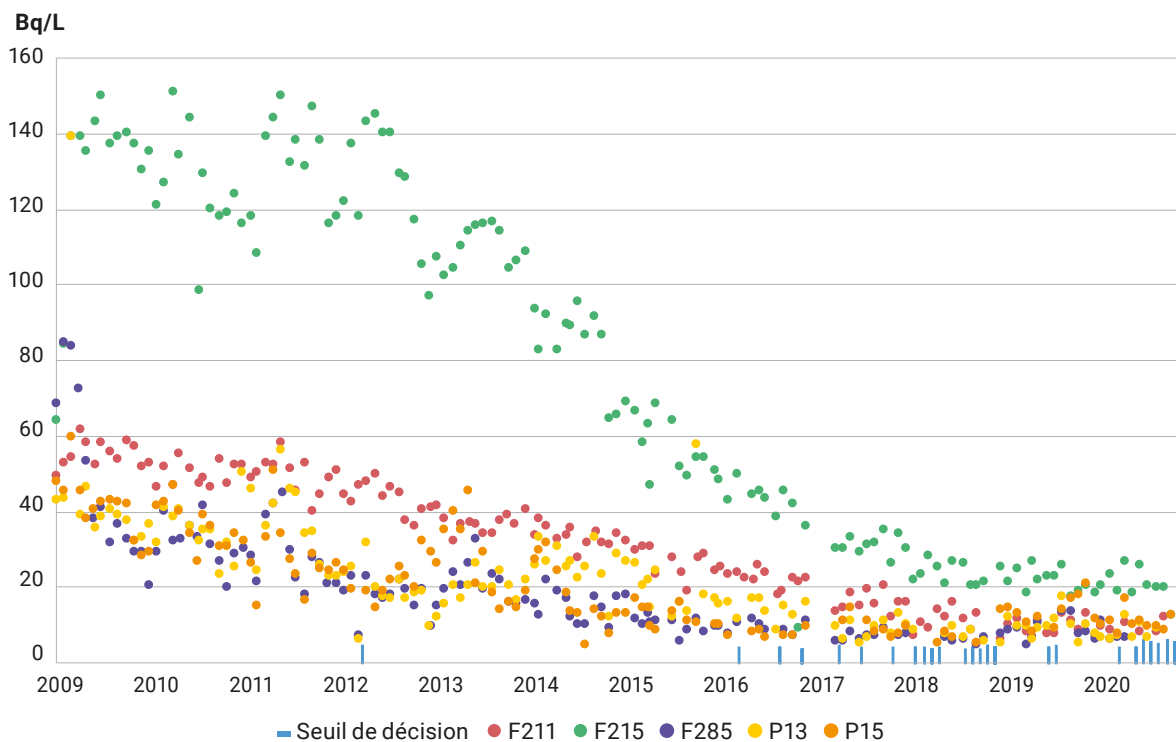


FIGURE 8 / ACTIVITÉS EN TRITIUM DANS LES EAUX DE NAPPE PHRÉATIQUE (Bq/L) PRÉLEVÉES SUR LE SITE (graphique du haut) ET AU SUD DU SITE (graphique du bas)



La surveillance radiologique des eaux de surface permet d'observer également un marquage en tritium, notamment à l'étang de Codolet situé au sud du site. L'évolution de l'activité volumique en tritium dans l'étang de Codolet présentée dans la figure 9 suit celle des eaux de nappes (figure 8). La moyenne de cette activité en tritium est passée de 21 Bq/L sur la période 2015-2017 à 10,1 Bq/L sur la période 2018-2020.

Les analyses effectuées régulièrement dans les eaux du Rhône mettent en évidence l'influence des autres installations nucléaires présentes dans la vallée du

Rhône (figure 10) ; les rejets des CNPE totalisent environ 95 % des rejets en tritium (cf. chapitre 3.1). L'activité en tritium à l'aval du site est en moyenne de 5 Bq/L sur la période 2018-2020 pour une gamme allant de 2,5 Bq/L à 14,1 Bq/L.

Concernant l'alimentation en eau potable (AEP), le tritium est le seul radionucléide détecté. La majorité des résultats de mesure est inférieure au seuil de décision avec cependant des activités de 12,4 Bq/L mesurées à Codolet et de 4,8 Bq/L mesurées à Saint-Étienne-des-Sorts en 2018.



Vue aérienne du site de Marcoule

© CEA

FIGURE 9 / ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS L'EAU PRÉLEVÉE DANS L'ÉTANG DE CODOLET AU SUD DU SITE DU CEA DE MARCOULE (Bq/L)

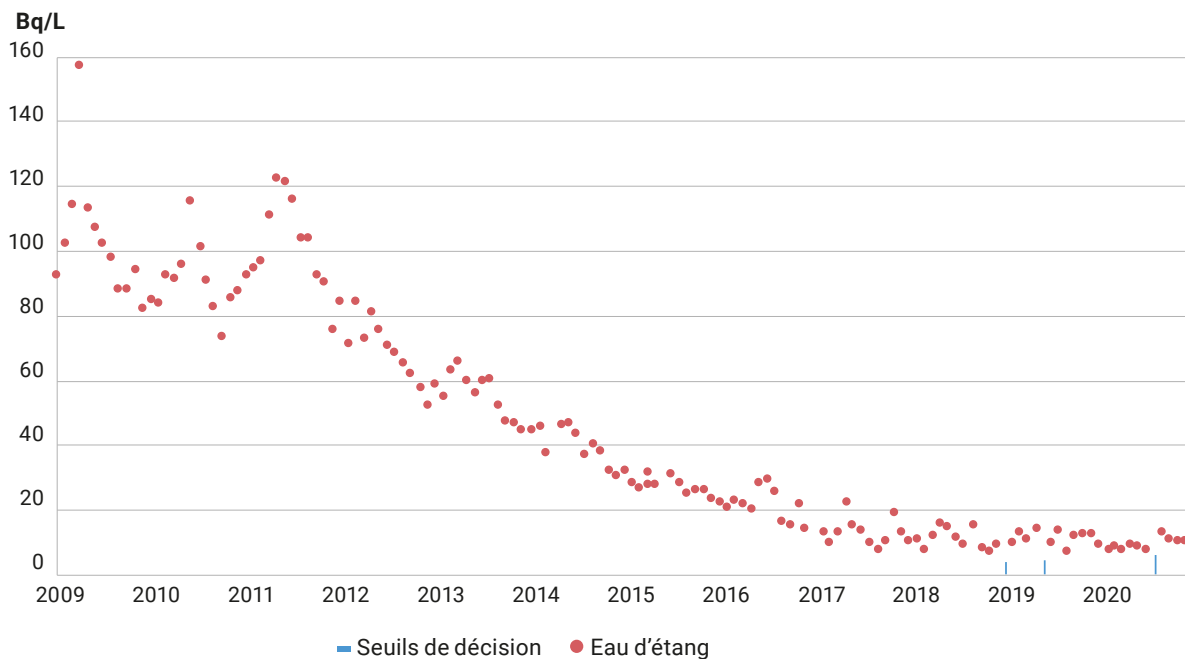
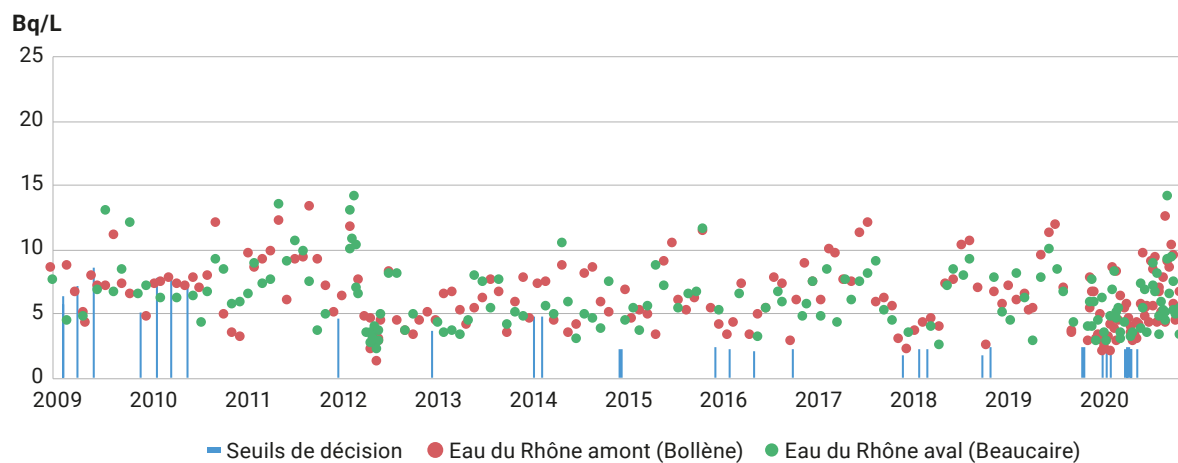


FIGURE 10 / ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS L'EAU DU RHÔNE PRÉLEVÉES EN AMONT (commune de Bollène) ET EN AVAL (commune de Beaucaire) DU SITE DE MARCOULE (Bq/L)



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 11 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 aujourd'hui de 225 Bq/kg de C. La moyenne des résultats acquis par l'IRSN sur la période 2018-2020 témoigne d'une augmentation moyenne de + 9 Bq/kg de C par rapport au bruit de fond actuel, soit + 4 %, due aux rejets du site. Cette activité spécifique mesurée est assez élevée au regard des faibles rejets gazeux de carbone-14 du site ; il est probable que les points

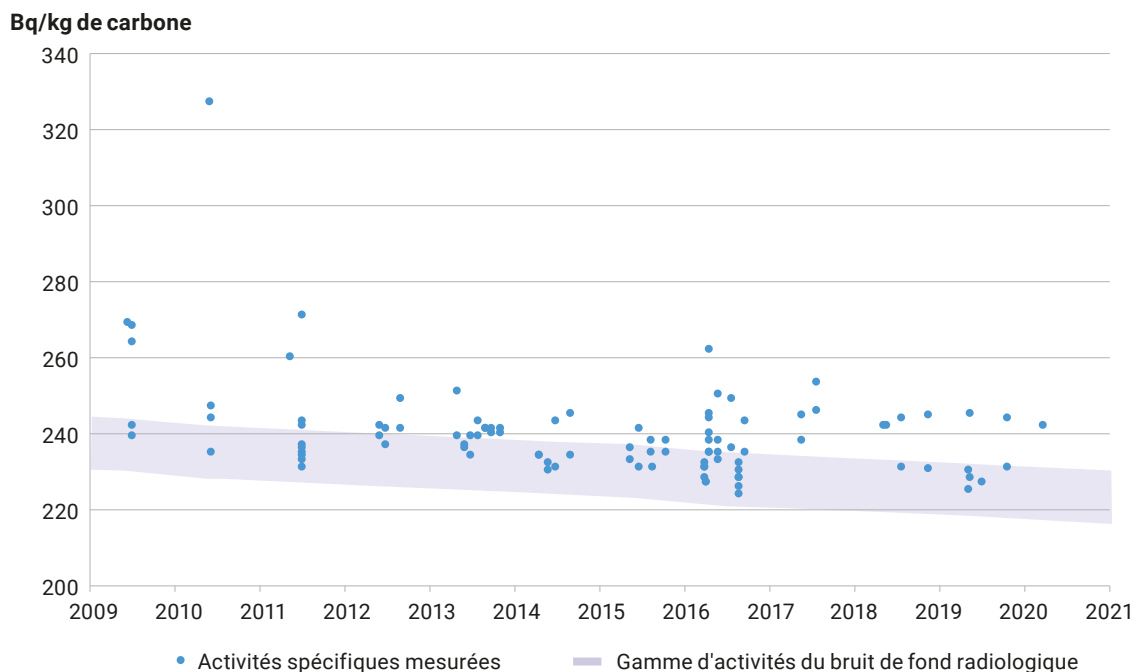
de prélèvement soient dans une zone particulièrement exposée aux rejets. À cette activité ajoutée exprimée par unité de masse de carbone, correspond une activité massique ajoutée de l'ordre de 0,3 Bq/kg frais pour une salade et 0,8 Bq/kg frais pour des fruits et 0,6 Bq/L pour du lait.

Le carbone-14 mesuré dans le milieu aquatique, et notamment dans les poissons du Rhône en aval de Marcoule, résulte principalement des rejets des CNPE rhodaniennes (cf. chapitre 3.1).

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 (cf. chapitre 2).

FIGURE 11 / ACTIVITÉ DE CARBONE-14 MESURÉE PAR L'IRSN DANS L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE DU CEA DE MARCOULE (Bq/kg de carbone)



De manière générale, les analyses effectuées sur des échantillons de sédiments prélevés dans le Rhône témoignent d'une relative stabilité des niveaux depuis 2009. Les graphiques de la figure 12 montrent cette stabilité tant à l'amont (graphique du haut) qu'à l'aval (graphique du bas). Les activités en césium-137 des sédiments prélevés dans le Rhône en aval du site sont plus élevées que celles des sédiments prélevés en amont : 15,2 Bq/kg sec comparés à 4,7 Bq/kg sec. On observe que les sédiments sont légèrement plus marqués à Codolet. Ceci étant, les activités mesurées correspondent aux valeurs 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. Le tableau 3 montre que les activités de ces radionucléides ne sont pas significativement différentes entre l'amont et aval. Pour ce qui concerne les poissons, un prélèvement réalisé en 2019 en aval du site présente des traces quantifiées de césium-137, d'américium-241 et de strontium-90 dans la gamme des valeurs mesurées habituellement dans le Rhône.

FIGURE 12 / ACTIVITÉS MASSIQUES DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES D'INTÉRÊT PRÉSENTS DANS LES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS DANS LE RHÔNE EN AMONT (graphique du haut) ET EN AVAL (graphique du bas) DU CEA DE MARCOULE (Bq/kg sec)



TABLEAU 3 / ACTIVITÉS MESURÉES DANS LES PLANTES AQUATIQUES PRÉLEVÉES EN AMONT ET EN AVAL DU CEA DE MARCOULE (Bq/kg sec)

Radionucléide	Valeur min. et max. en amont (Bq/kg sec) Saint-Étienne des Sorts	Valeur min. et max. en aval (Bq/kg sec) Codolet
³ H	0,34 – 0,65	0,38 – 3,43
¹³⁷ Cs	0,47 – 0,88	0,17 – 0,22
⁶⁰ Co	0,38 – 0,44	0,08
⁹⁰ Sr	0,54	0,15 – 0,30
²⁴¹ Am	< SD – 0,012	0,009 – 0,018
²³⁸ Pu	< SD	< SD
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	0,027 – 0,037	0,010 – 0,065

Conclusion et évaluations dosimétriques

La diminution des activités en 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 2018-2020, le nombre de mesures significatives (supérieures au seuil de décision) est beaucoup plus faible qu'auparavant ; ainsi, les résultats de mesure de HTO dans l'air supérieurs au seuil de décision métrologique ne représentent plus que 26 % des analyses, ce qui ne permet plus l'obtention de valeurs moyennes⁽¹⁾. Toutefois, une estimation majorante des doses potentiellement reçues par la population a été faite suivant la méthodologie décrite dans le chapitre 9 d'annexes, à partir des résultats de mesure de l'activité dans l'air et en considérant que les activités volumiques réelles sont égales aux seuils de décision. La dose ainsi calculée serait de 0,07 µSv/an ; elle résulterait pour moitié de l'ingestion de denrées produites localement et pour moitié de l'inhalation et du passage transcutané du tritium présent dans l'air. Cette dose est près de 6 fois inférieure à celle relative à la période 2011-2014 qui avait été estimée à 0,4 µSv/an pour le *Bilan radiologique* correspondant. Cette diminution résulte de la baisse des rejets gazeux de tritium des INBS à partir de 2012.

Enfin, l'estimation de 0,07 µSv/an faite pour le présent bilan est très proche de celle de 0,084 µSv/an mentionnée dans le *Livre Blanc du tritium* publié par l'ASN et qui résulte d'un calcul effectué par le CEA sur la base des rejets de 2019.

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 9 d'annexes, la dose due au carbone-14 serait de l'ordre de 0,06 µSv/an. Cette valeur, basée sur un nombre restreint de résultats de mesures acquis sur des échantillons probablement prélevés dans une zone particulièrement exposée aux rejets du site, 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.

(1) Les moyennes ne sont calculées que si le pourcentage de mesures significatives (>SD) est d'au moins 50 % (cf. chapitre 9 d'annexes).

Le site de Saclay

Le site de Saclay, rattaché 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 huit installations nucléaires de base (INB) du CEA, dont seulement quatre sont encore en exploitation sur le site :

- le laboratoire d'étude des combustibles irradiés (LECI-INB 50) ;
- l'irradiateur gamma Poséidon (INB 77) ;
- la zone de gestion des déchets radioactifs solides (INB 72) ;
- la zone de gestion des effluents radioactifs liquides (INB 35).

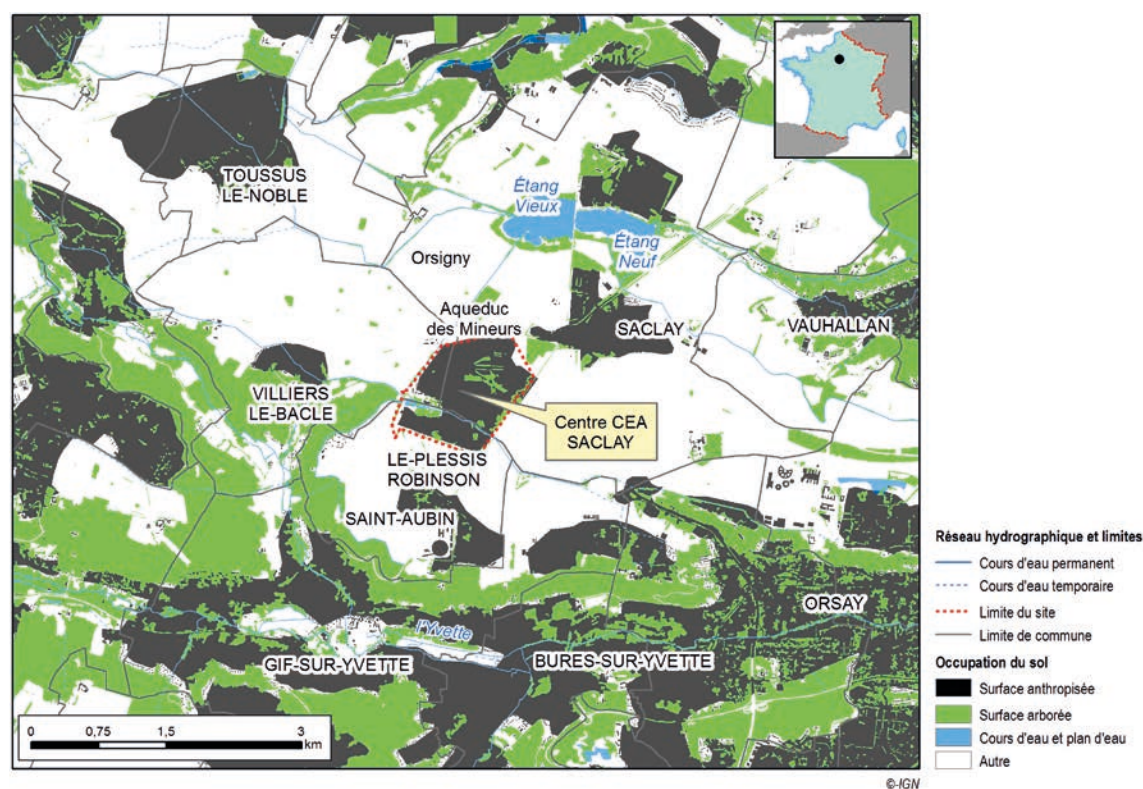
Les quatre autres INB qui ne sont plus en fonctionnement à ce jour sur le site, sont d'une part trois réacteurs de recherche :

- le réacteur Ulysse (INB 18, réacteur de faible puissance) mis en service en 1961 pour l'enseignement et la formation. Il a été arrêté définitivement en février 2007, et 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 ;

- 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. Il 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, et d'autre part, 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 se compose aujourd'hui de cellules en majorité vides et en cours d'assainissement est à l'arrêt définitif et au stade du démantèlement dans le cadre du décret du 18 septembre 2008.

FIGURE 1 / IMPLANTATION GÉOGRAPHIQUE DU SITE DE SACLAY



À noter également la présence de l'ICPE autorisée (rubrique 2797) du Service de chimie bio-organique et de marquage (SCBM) qui a des activités de recherche à finalité médicale et dans d'autres domaines comme la caractérisation des nanomatériaux et leur devenir *in vivo*. Cette installation utilise les techniques de marquage isotopique au tritium et carbone-14.

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.

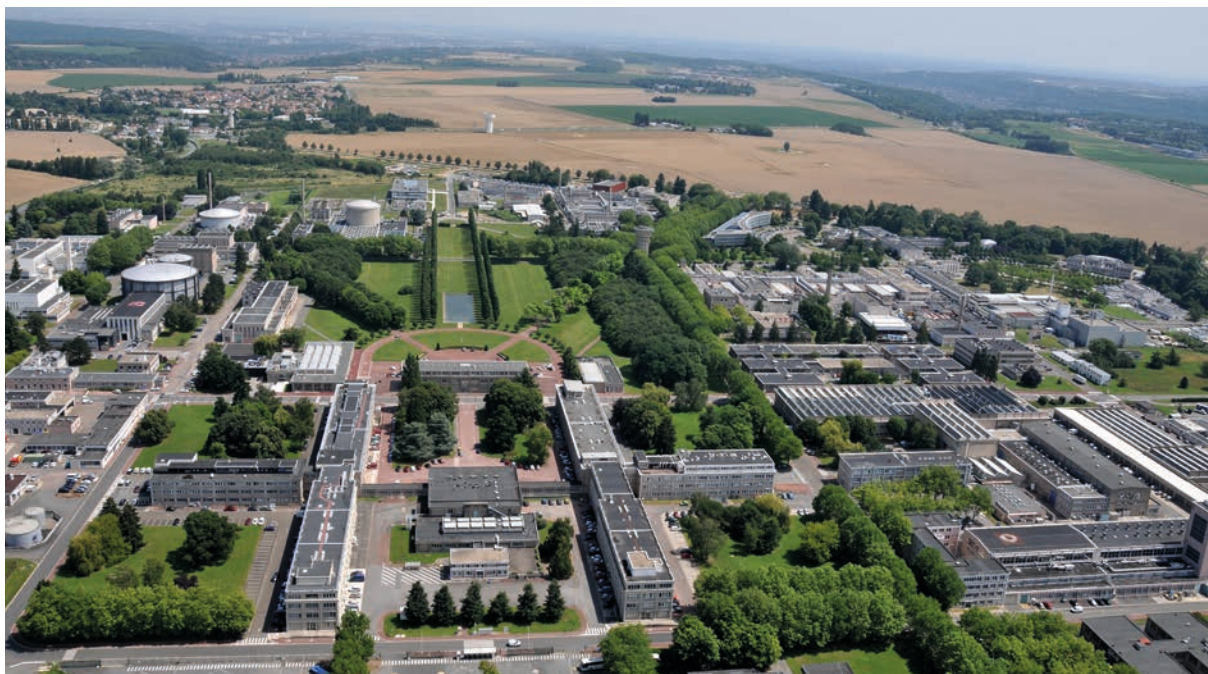
Rejets et plans de surveillance

La figure 2 présente l'évolution des rejets gazeux et liquides sur la période allant de 2016 à 2019. À l'exception des émetteurs β - γ et des iodes, les activités des rejets gazeux annuels ont diminué dans le temps.

En effet, l'évolution globale est à la baisse pour les rejets de gaz rares suite à l'arrêt des réacteurs de recherche ainsi que pour le tritium du fait de l'activité du laboratoire de marquage (en 2018, utilisation accrue du carbone-14 dans les méthodes de marquage des molécules). 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 gazeux que dans les rejets liquides.

Après traitement, les effluents liquides du site débouchent *via* l'aqueduc des Mineurs dans l'Étang Vieux puis par un trop-plein dans l'Étang Neuf. Celui-ci se déverse ensuite vers le ruisseau de Vauhallan, un affluent de la Bièvre (figure 1).

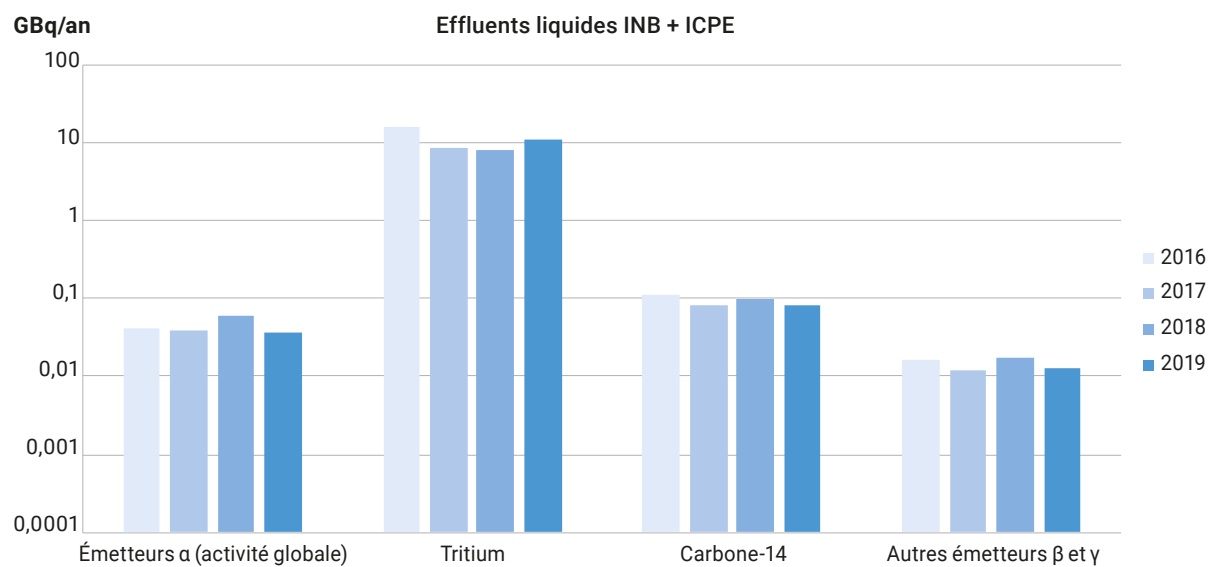
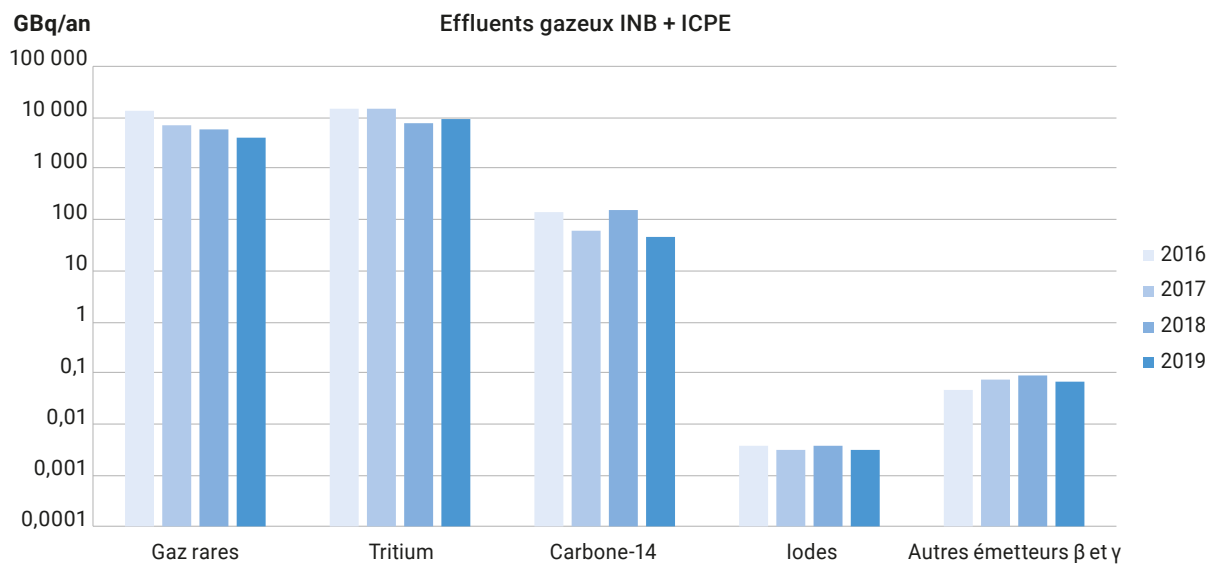
Le tableau 1 présente les plans de la surveillance radiologique environnementale réalisée autour du site de Saclay par le CEA et l'IRSN.



Le site de Saclay

© CEA

FIGURE 2 / REJETS GAZEUX ET LIQUIDES DES INSTALLATIONS DU SITE DE SACLAY SUR LA PÉRIODE 2016-2019 (GBq/an)





© CEA

INB 72 de Saclay

TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DU SITE DE SACLAY

Milieu surveillé ou nature du contrôle	CEA	IRSN
Air au niveau du sol	4 points de prélèvements continus : mesures α et β global 4 points de prélèvements hebdomadaires : 4 mesures ^3H et 1 mesure ^{14}C	1 station de prélèvements en continu d'aérosols à 700 m ³ /h avec 1 mesure de spectrométrie gamma à une fréquence hebdomadaire
Rayonnement gamma ambiant	4 points dans l'environnement plus 20 points de clôture	1 point
Pluie	2 points de prélèvements hebdomadaires : mesures de ^3H et β global	1 point de prélèvements : 1 mesure mensuelle ^3H et spectrométrie γ
Milieu récepteur des rejets liquides (eau et sédiments)	8 points de prélèvements continus : <ul style="list-style-type: none"> eau (4 points) : analyses hebdomadaires à mensuelles ^3H, α et β global, potassium, Sr, spectrométrie γ sédiments (4 points) : analyses semestrielles à quinquennales α et β, ^3H lié, ^{14}C, K, ^{90}Sr, Pu, U, Am, Th, Cs, Co, I 	<ul style="list-style-type: none"> Eau : 3 points de prélèvements et 1 mesure semestrielle de : ^3H, potassium, Sr, spectrométrie γ Sédiments : 1 point de prélèvements et 1 mesure semestrielle de Pu, Am, Sr, spectrométrie γ Faune et flore aquatiques : mesures ^3H libre et lié, ^{14}C, spectrométrie γ
Eaux souterraines	27 points de prélèvements mensuels à annuels : mesures ^3H , α et β global, K	2 points de prélèvements et mesures semestrielles par point en ^3H
Lait	2 points de prélèvements mensuels à annuels : mesures ^3H libre et lié, ^{14}C , ^{131}I et spectrométrie γ	1 point de prélèvements semestriel et 1 mesure de ^3H libre et spectrométrie γ
Végétaux (fruits, légumes, herbes)	4 points de prélèvements mensuels à annuels : mesures spectrométrie γ , ^3H libre et lié, ^{14}C	7 points de prélèvements annuels avec ^3H libre et lié, ^{14}C et spectrométrie γ
Céréales	–	1 point de prélèvements annuel et 1 mesure de spectrométrie γ

Influence du site de Saclay sur son environnement et exposition de la population

Le tritium

Les mesures de surveillance environnementale montrent l'influence des rejets de tritium. Des activités de tritium supérieures au bruit de fond radiologique naturel ou hérité des retombées anciennes (chapitre 2), sont ainsi observées dans tous les compartiments de l'environnement. Les analyses des prélèvements d'air effectués au niveau des stations de Saclay, Saint-Aubin, Villiers-le-Bâcle et Orsigny permettent de mesurer le tritium sous forme de vapeur d'eau (HTO) et le tritium sous forme de gaz (HT et formes organiques comme par exemple le CTH₃) (figure 3). L'activité volumique du tritium dans l'air au niveau de ces 4 stations est le plus souvent inférieure aux seuils de décision ($\approx 0,12 \text{ Bq/m}^3$), mais présente ponctuellement

des valeurs très supérieures au bruit de fond actuel du tritium atmosphérique (de l'ordre de $0,01 \text{ Bq/m}^3$ d'air pour la vapeur d'eau tritiée). Entre 2018 et 2020, la valeur maximale de tritium dans la vapeur d'eau a été mesurée dans un prélèvement effectué à la station de Villiers-le-Bâcle en 2019 : $0,7 \text{ Bq/m}^3$ (figure 3) ; la valeur des formes gaz tritiés (HT + formes organiques) la plus élevée provient du même prélèvement à la station de Villiers-le-Bâcle : $2,09 \text{ Bq/m}^3$.

De même, si la grande majorité des activités en tritium mesurées dans l'eau de pluie se situe en dessous du seuil de décision, des activités supérieures au bruit de fond (entre $0,5$ et 2 Bq/L) sont ponctuellement mesurées : comprises entre $4,3 \text{ Bq/L}$ et 70 Bq/L pour la période 2018-2020 (figure 4). Lors de la période précédente de 2015 à 2017, le niveau maximal relevé était de 320 Bq/L .

FIGURE 3 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES DU TRITIUM DANS L'AIR (HTO + gaz tritiés) PRÉLEVÉ PAR LES STATIONS DE SURVEILLANCE À PROXIMITÉ DU CEA DE SACLAY (Bq/m^3)

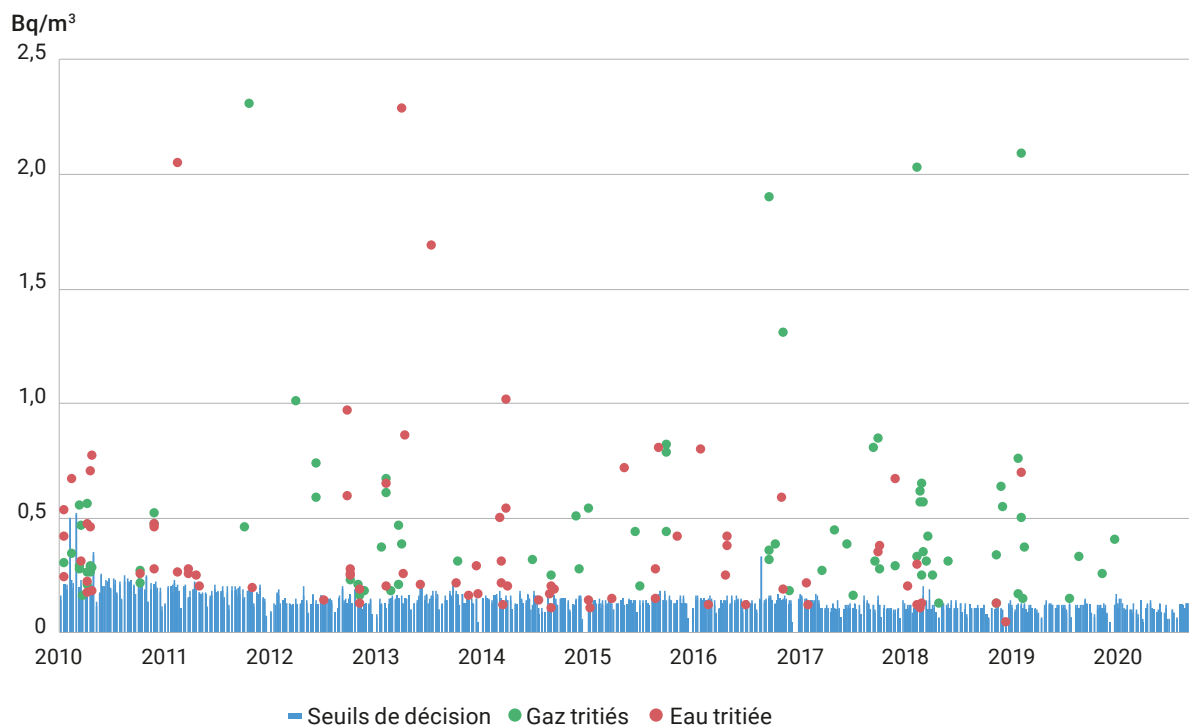
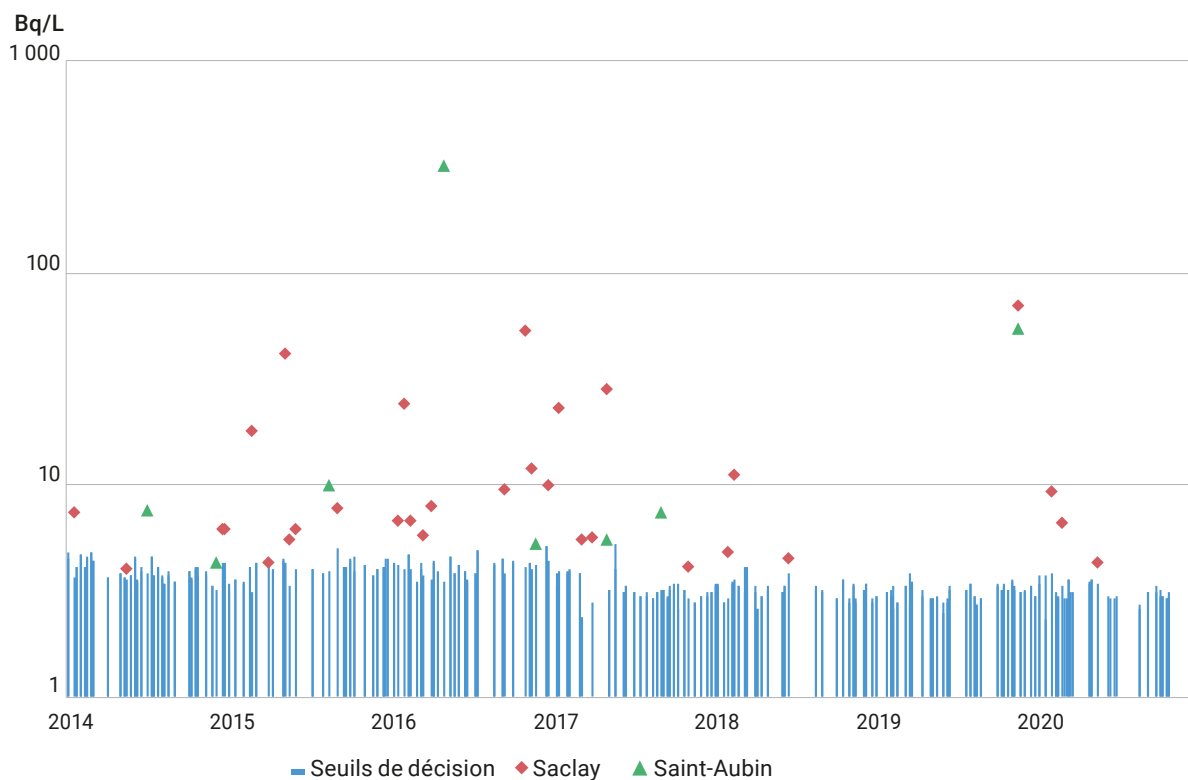


FIGURE 4 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DANS L'EAU DE PLUIE COLLECTÉE AUX STATIONS DE SURVEILLANCE À PROXIMITÉ DU CEA DE SACLAY (Bq/L)



En conséquence de ces activités de tritium mesurées dans la vapeur d'eau atmosphérique (HTO) et dans l'eau de pluie, les activités en tritium des fruits, des herbages et du lait dépassent régulièrement le bruit de fond radiologique (de moins de 0,5 à 2 Bq/L ou Bq/kg frais, figure 5).

Les rejets du site de Saclay influencent également l'environnement aquatique. Ainsi, dans l'aqueduc des Mineurs, canalisant les rejets du site, les activités en tritium mesurées sur la période 2018-2020 varient de 3,5 à 71 Bq/L pour une activité moyenne de 8,8 Bq/L (figure 6). Il en va de même dans les étangs où l'activité volumique du tritium varie de 3 à 14 Bq/L sur cette même période (figure 7).

FIGURE 5 / ACTIVITÉS DU TRITIUM LIBRE DANS LE LAIT, L'HERBE ET LES FRUITS ET LÉGUMES PRÉLEVÉS DANS L'ENVIRONNEMENT DU CEA DE SACLAY

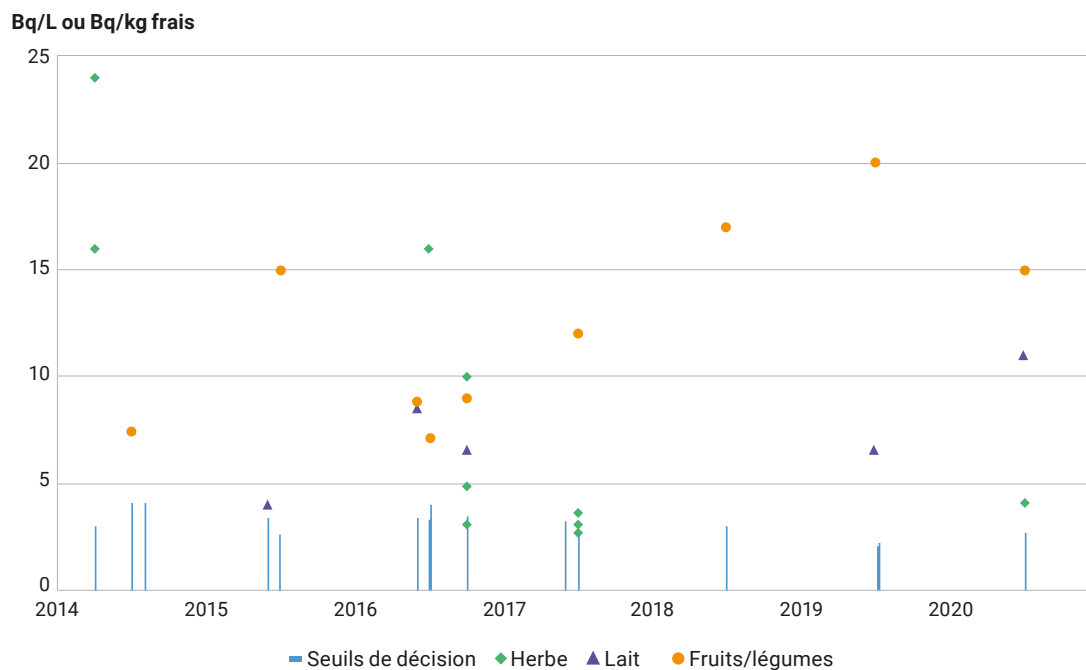


FIGURE 6 / ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS L'EAU DE L'AQUEDUC DES MINEURS (Bq/L)

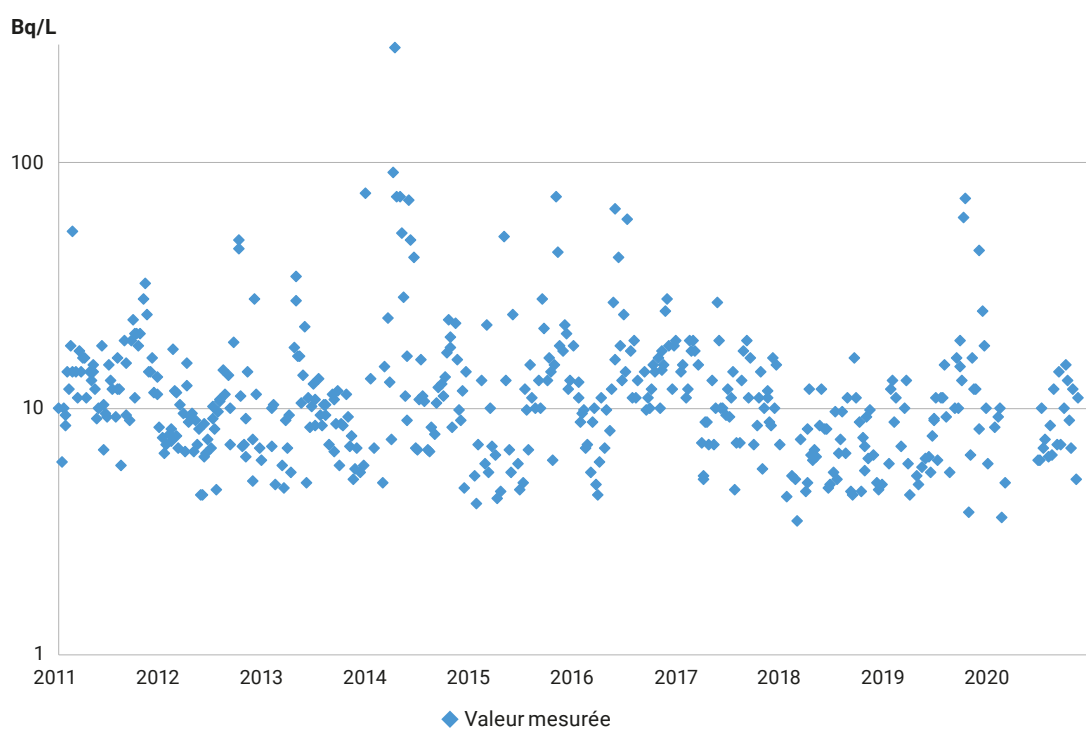
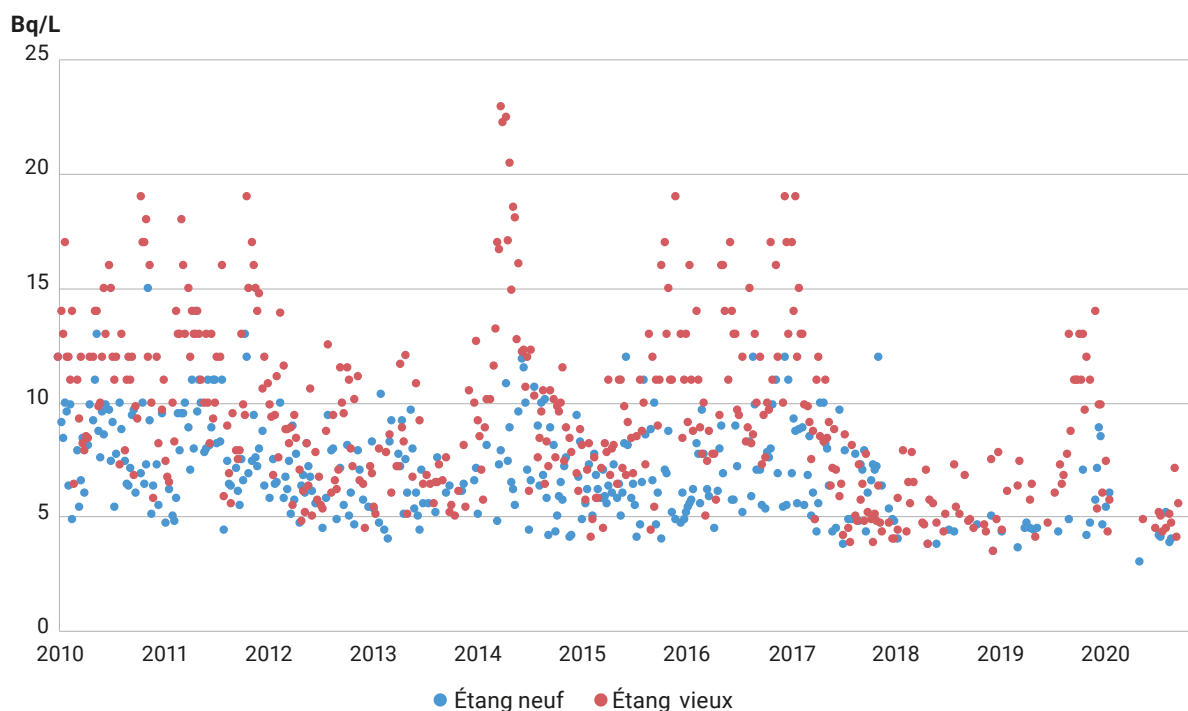


FIGURE 7 / ACTIVITÉS DU TRITIUM LIBRE DANS L'EAU DES ÉTANGS VIEUX ET NEUF (Bq/L)



Les activités en tritium libre mesurés dans les poissons et les roseaux des étangs sont de l'ordre ou très légèrement supérieures au bruit de fond du tritium libre dans l'environnement.

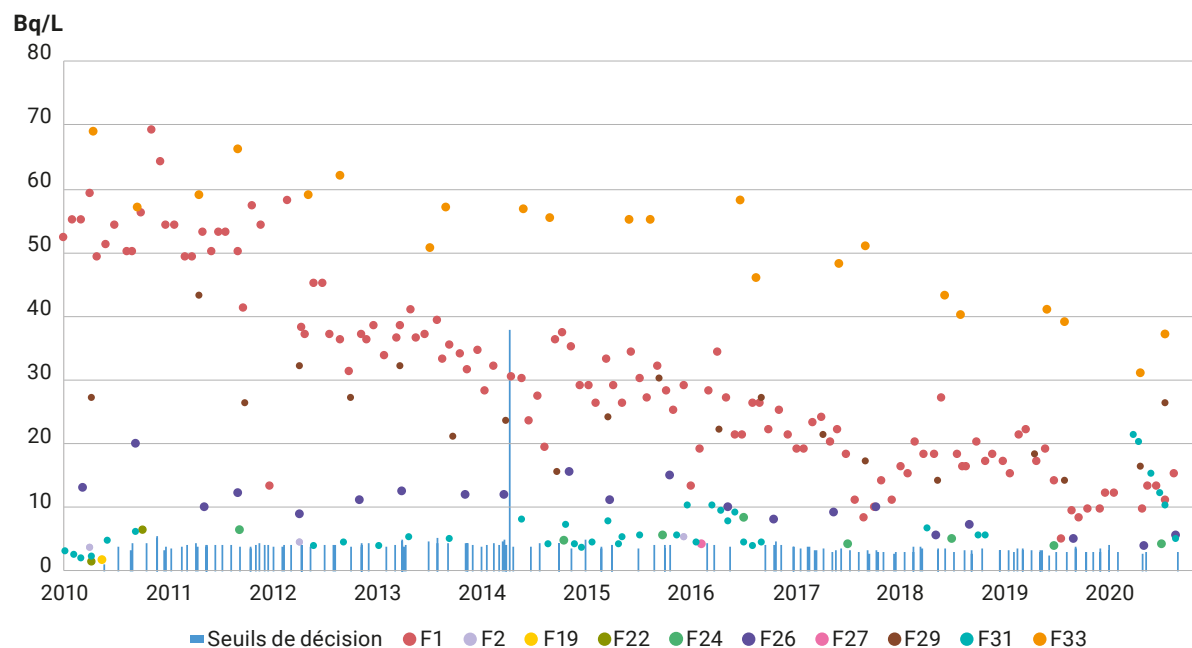
Les eaux souterraines prélevées entre 2018 et 2020 au niveau de plusieurs piézomètres situés à l'extérieur du site de Saclay, présentent des valeurs en tritium supérieures au bruit de fond avec une moyenne de 10,5 Bq/L. Notons également que dans les nappes les plus marquées par les rejets du site (F1 et F33 notamment), les activités mesurées sont en constante diminution depuis 2010 (issues des piézomètres F1 et F19 notamment) (figure 8).

L'impact dosimétrique des rejets gazeux et liquides de tritium sur la période 2015-2017 a pu être calculé uniquement pour l'ingestion. En effet, du fait du nombre très élevé de mesures inférieures au seuil de décision dans le compartiment atmosphérique, les voies de transfert par inhalation et passage au travers de la peau (transcutané) n'ont pu donner lieu au calcul des doses associées (cf. chapitre 9 d'annexes). Cette dose serait toutefois très inférieure à celle due à l'ingestion de denrées 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⁽²⁾ de poissons par an provenant de l'Étang Neuf, et s'approvisionnerait en légumes et en produits animaux produits localement. Sur la base de ces hypothèses, la dose ingestion engagée par cette personne serait de 0,13 μ Sv/an pour la période 2018-2020, dont 92 % proviendraient de l'ingestion d'eau ; cette dose avait été estimée à 0,15 μ Sv/an pour la période antérieure (2015-2017). Elle est par ailleurs tout à fait cohérente avec celle estimée par le CEA pour 2018 sur la base des rejets : entre 0,02 et 0,12 μ Sv/an pour un adulte (le tritium représentant entre 3 et 15 % de la dose totale à l'adulte de 0,8 μ Sv/an estimée par le CEA dans son rapport de 2018).

(2) Cette valeur est proposée par l'InVS-Anses et l'Afssa pour la consommation annuelle de poissons d'eau douce.

FIGURE 8 / ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN TRITIUM DANS L'EAU DE NAPPE DU PLATEAU DE SACLAY
 ISSUE DE DIFFÉRENTS PIÉZOMÈTRES EXTÉRIEURS AU SITE (Bq/L)



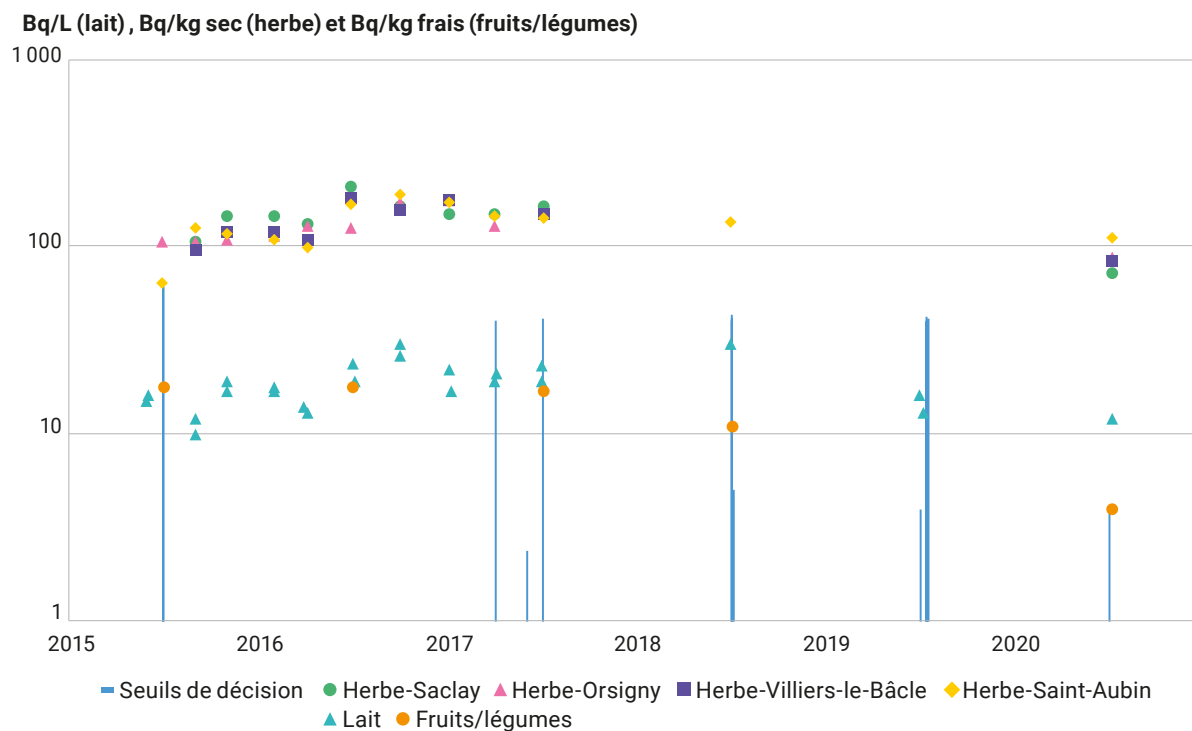
Carbone-14

Les rejets atmosphériques de carbone-14 du site de Saclay n'ont pas d'influence visible sur l'environnement. Avant 2015, l'activité dans l'air n'était jamais quantifiée. Depuis, grâce à l'abaissement du seuil de décision, le CEA mesure régulièrement le carbone-14 de l'air, essentiellement sous forme de dioxyde de carbone ($^{14}\text{CO}_2$). Son activité volumique moyenne, sous cette forme, s'établit ainsi à $0,047 \text{ Bq/m}^3$ 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'herbages et de fruits et de légumes (figure 9). Toutefois, et en cohérence avec les activités de $^{14}\text{CO}_2$ mesurées dans l'air sur la période 2018-2020, les activités moyennes mesurées dans le lait, les fruits et légumes et l'herbe (respectivement de $17,8 \text{ Bq/L}$, $7,7 \text{ Bq/kg}$ frais et $98,2 \text{ Bq/kg}$ sec) ne se différencient pas du bruit de fond du carbone-14 (de l'ordre de 14 à 15 Bq/L pour le lait et jusqu'à plus 100 Bq/kg sec pour les herbages).

Bien que les rejets liquides annuels de carbone-14 soient également faibles, l'étude réalisée sur la période 2014-2017 avait montré que les activités mesurées dans les poissons de l'Étang Vieux et de l'Étang Neuf étaient élevées (activité massique moyenne de 480 Bq/kg frais). Pour les poissons prélevés entre 2018 et 2020, l'activité massique moyenne obtenue est de 411 Bq/kg frais. Ces valeurs 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 de plusieurs années, voire dizaines d'années de rejets.

FIGURE 9 / ACTIVITÉ VOLUMIQUE ET MASSIQUE DU CARBONE-14 MESURÉE EN MILIEU TERRESTRE ENTRE 2015 ET 2020



La pêche dans l'Étang Vieux, classé ZNIEFF⁽³⁾ est interdite ; ce n'est pas le cas dans l'Étang Neuf. Une personne qui consommerait 5,3 kg/an de poissons pêchés dans l'Étang Neuf, avec une activité moyenne ajoutée de 389 Bq/kg, recevrait une dose de 1,2 μ Sv. Cette valeur est cohérente avec celle obtenue lors du précédent bilan radiologique, sur la période 2015-2017 (1,4 μ Sv) et celle estimée par le CEA dans son rapport TSN de 2019 : 1,35 μ Sv/an en considérant une consommation de poissons de 8 kg/an.

Les autres radionucléides

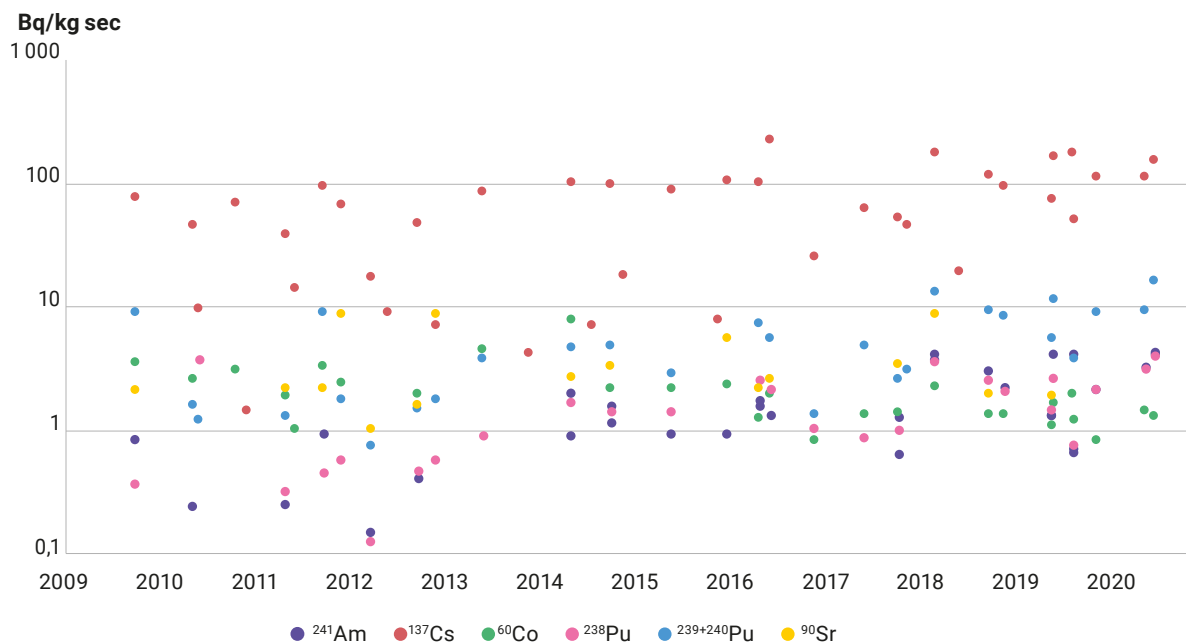
Exceptés pour le césium-137 rémanent des retombées anciennes, les analyses effectuées sur les filtres d'aérosols de la station à grand débit de l'IRSN installée à Orsay, révèlent généralement des valeurs inférieures au seuil de décision. Toutefois, comme au cours de la période d'étude précédente, de l'iode-131 a été détecté significativement 1 fois au cours de cette période : en février 2018 à hauteur de 0,27 μ Bq/m³. Cette valeur est du même ordre que celles mesurées à plusieurs reprises au cours des années antérieures (cf. *Bilans radiologiques 2011-2014 et 2015-2017*).

(3) Zone naturelle d'intérêt écologique, floristique et faunistique.

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 (de quelques becquerels à plusieurs dizaines, voire centaines de becquerels pour le césium-137) ainsi que le rapport d'activité $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$, supérieur de 1,7 à 26 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 mesurable 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 5,8 mBq/L tandis que la moyenne du strontium-90 s'établit à 2,4 mBq/L sur la période étudiée. Pour les roseaux, les niveaux de ^{137}Cs sont en moyenne de 2,3 Bq/kg sec et pour le ^{90}Sr de 0,9 Bq/kg sec. Dans les poissons analysés en 2020, l'activité du césium-137 est d'environ 0,2 Bq/kg frais et celle du strontium-90 est inférieure au seuil de décision de 0,03 Bq/kg frais. Ces détections résultent 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 PRÉLEVÉS AU NIVEAU DE 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 sur forme gazeuse dans l'atmosphère. Les rejets ont considérablement diminué depuis les années 1970 et se sont stabilisés depuis les années 2000 autour de 300 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 JUSQU'EN 2019 (le plan de surveillance a été légèrement modifié par arrêté à partir de 2020)

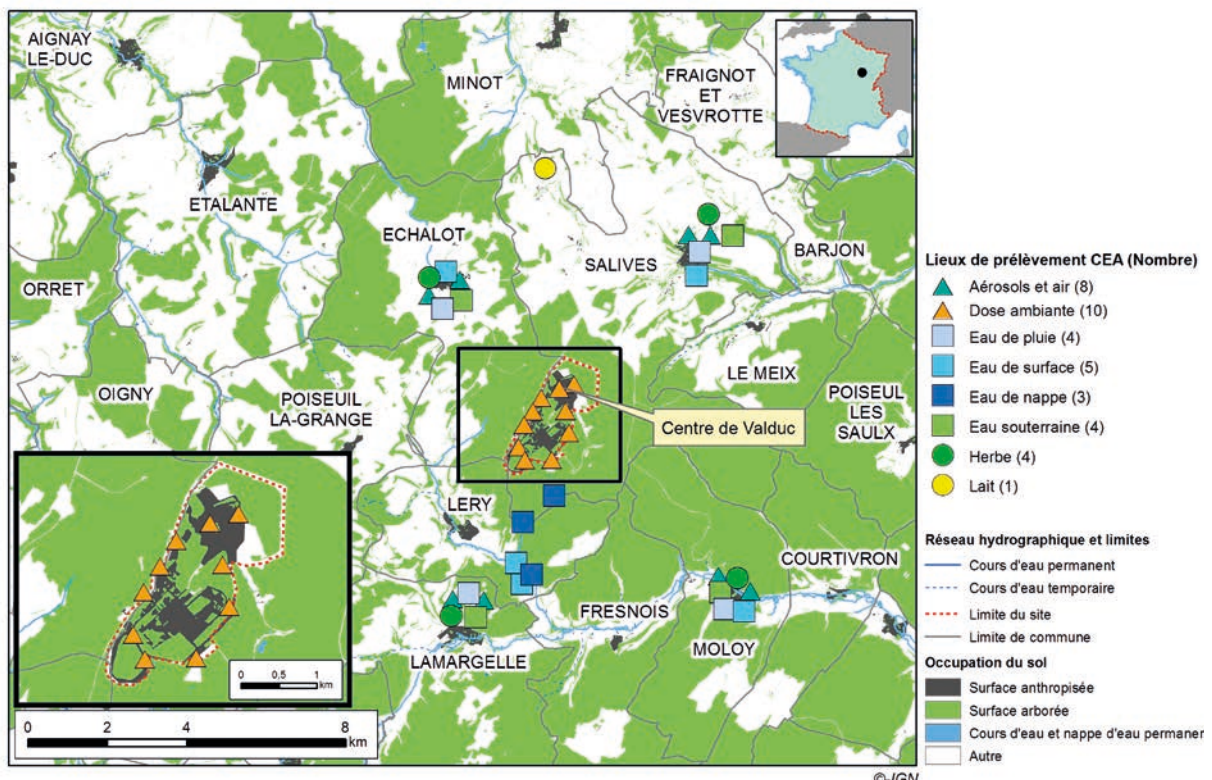


FIGURE 1B / LOCALISATION DES POINTS DE SURVEILLANCE DE L'IRSN AUTOUR DU SITE DE VALDUC

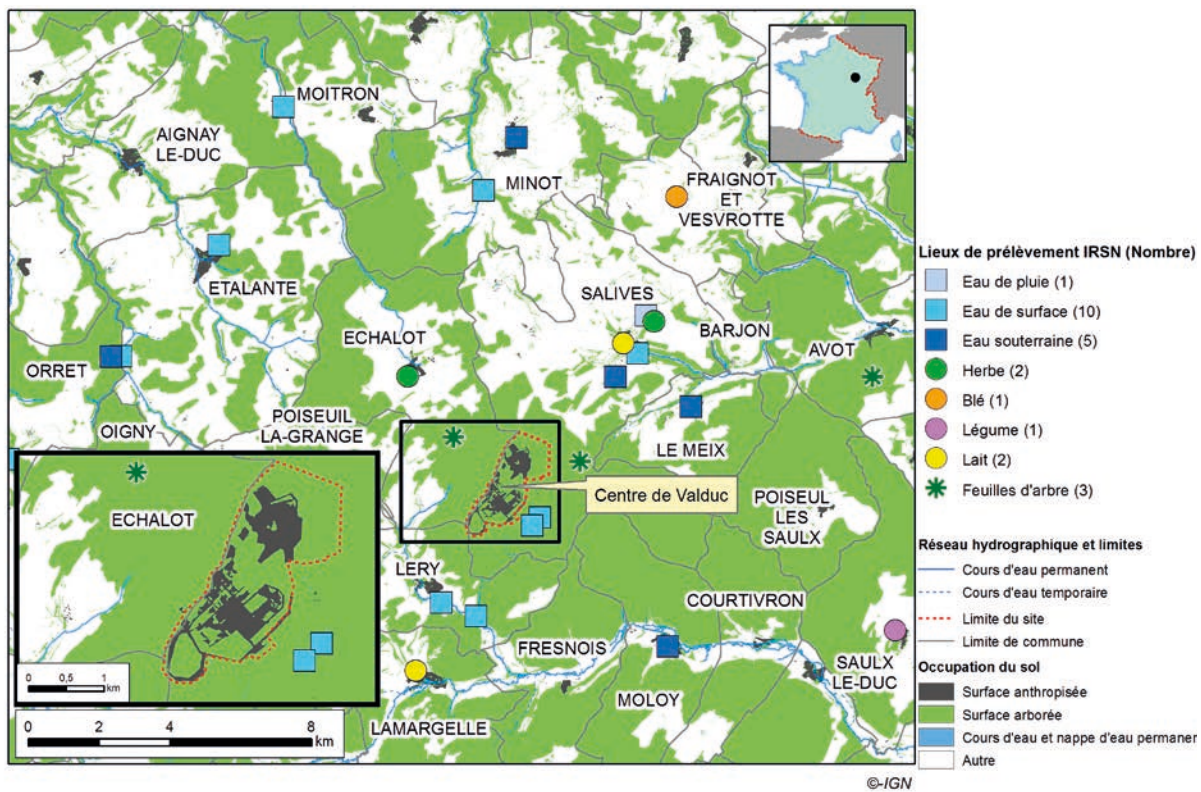


FIGURE 2 / REJETS D'EFFLUENTS GAZEUX ATMOSPHÉRIQUES DE TRITIUM DU SITE DE VALDUC

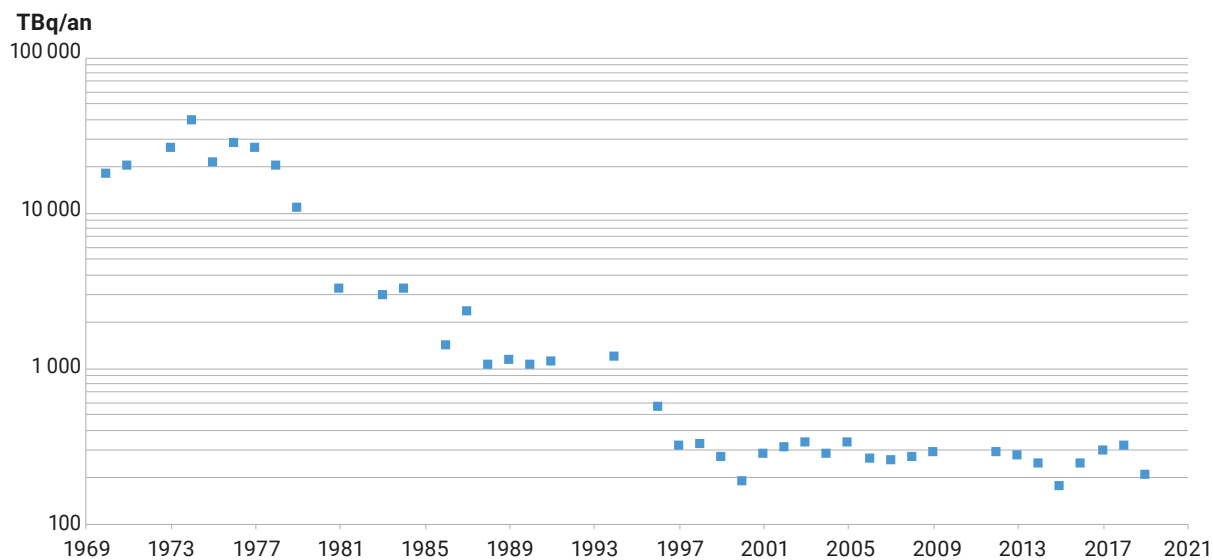


TABLEAU 1 / PLANS DE SURVEILLANCE DU SITE DE VALDUC

Milieu surveillé ou nature du contrôle	CEA	IRSN
Rayonnement gamma ambiant	<ul style="list-style-type: none"> Jusqu'en 2019 : 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 À partir de 2020* : 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 prélèvements à Échalot, Moloy et Léry : activités α et β globales (hebdomadaire) 1 point de prélèvements à Salives : activités α et β globales (quotidien) 	
Tritium dans l'air	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvements à Échalot, Moloy, Léry et Salives : tritium dans l'air HTO - HT (hebdomadaire) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvements à Salives : tritium dans l'air HTO - HT (hebdomadaire)
Eau de pluie	<ul style="list-style-type: none"> 4 points de prélèvements à Échalot, Moloy, Léry, Salives : tritium (hebdomadaire) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvements à Salives : tritium (hebdomadaire)
Lait	<ul style="list-style-type: none"> Jusqu'en 2019 : 1 point de prélèvements à Salives (Larçon) : tritium, spectrométrie γ (mensuel) À partir de 2020* : 1 point de prélèvements à Salives (Larçon) : tritium libre et organiquement lié, spectrométrie γ (trimestriel) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvements à Salives (Larçon) : tritium libre et organiquement lié (semestriel) 2 points de prélèvements au nord-ouest et au sud-ouest du site : tritium libre (trimestriel)
Herbe Production agricole de référence	<ul style="list-style-type: none"> Jusqu'en 2019 : 4 points de prélèvements d'herbe à Échalot, Moloy, Léry et Salives : tritium (mensuel), spectrométrie γ (rotation mensuelle sur les 4 points) À partir de 2020* : 1 point de prélèvements d'une production agricole à Salives (Lieu-dit-Montarmet) : tritium libre et organiquement lié (annuel) 	<ul style="list-style-type: none"> 3 points de prélèvements à Échalot, Léry et Salives : tritium libre et organiquement lié (annuel)
Feuilles d'arbre		<ul style="list-style-type: none"> 5 points de prélèvements à Échalot, Léry, Salives, Avot et Vernois-les-Vesvres : tritium libre et organiquement lié (annuel)
Légumes		<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvements à Salives (Larçon) : tritium libre et organiquement lié (annuel)
Viande		<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvements au nord-ouest ou au sud-ouest du site : tritium organiquement lié (annuel)
Blé		<ul style="list-style-type: none"> 1 prélèvement d'un mélange départemental : tritium organiquement lié, spectrométrie γ (annuel)
Eau de surface	<ul style="list-style-type: none"> Jusqu'en 2019 : 5 points de prélèvements 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 prélèvements 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"> 9 points de prélèvements à Étalante (2 points), Léry (2 points), Minot, Moitron, Moloy, Orret et Salives : activité β globale, potassium, tritium (semestriel) 1 point de prélèvements au Grand Étang sur le site du CEA : activités α et β globales, potassium, tritium, spectrométrie γ (semestriel)
Eau de source ou résurgence	<ul style="list-style-type: none"> À partir de 2020* : 3 points de prélèvements dans les résurgences R111, R14 (mensuel) et R22 (trimestriel) 	<ul style="list-style-type: none"> 8 points de prélèvements à Étalante (2 points), Le Meix, Minot, Moitron, Moloy, Poiseul-la-ville-et-Laperrière et Salives : activité β globale, potassium, tritium (semestriel)
Tritium dans l'eau de consommation	<ul style="list-style-type: none"> À partir de 2020* : 4 points de prélèvements dans les villages Échalot, Moloy, Salives, Léry : tritium dans l'eau HTO (trimestriel) 	

* 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 site de Valduc est visible dans toutes les composantes de son environnement sur plusieurs dizaines de kilomètres. Le tritium dans l'air est prélevé avec une fréquence hebdomadaire par des barboteurs sur 4 stations de prélèvements situées sur les communes de l'Échalot (NNO), Salives (NE), Léry (SSO) et Moly (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 valeurs moyennes et maximales par station dans le tableau 2. L'activité moyenne en vapeur d'eau tritiée des mesures effectuées sur la période 2018-2020 est de 0,7 Bq/m³ à l'Échalot. Les valeurs les plus élevées sont mesurées au nord du site, notamment sur la commune d'Échalot avec une valeur maximale de 3,9 Bq/m³ en vapeur d'eau tritiée (HTO) mesurée en novembre 2018 et à Salives avec 0,9 Bq/m³ en tritium

sous la forme gazeuse (HT) mesurée en février 2019. Toutefois, le taux de détection du tritium dans la vapeur d'eau, inférieur à 50 % pour la période 2018-2020 pour la commune de Salives, n'a pas permis de calculer une moyenne et d'estimer de dose. Mais l'IRSN assure depuis 2019 une surveillance du tritium dans l'air sur cette commune à l'aide de piègeurs passifs. Au cours de la période 2019-2020 ces résultats d'analyses permettent de calculer une activité moyenne du tritium dans la vapeur d'eau tritiée de 0,26 Bq/m³ ; cette moyenne était de 0,5 Bq/m³ sur la période précédente (2015-2017).

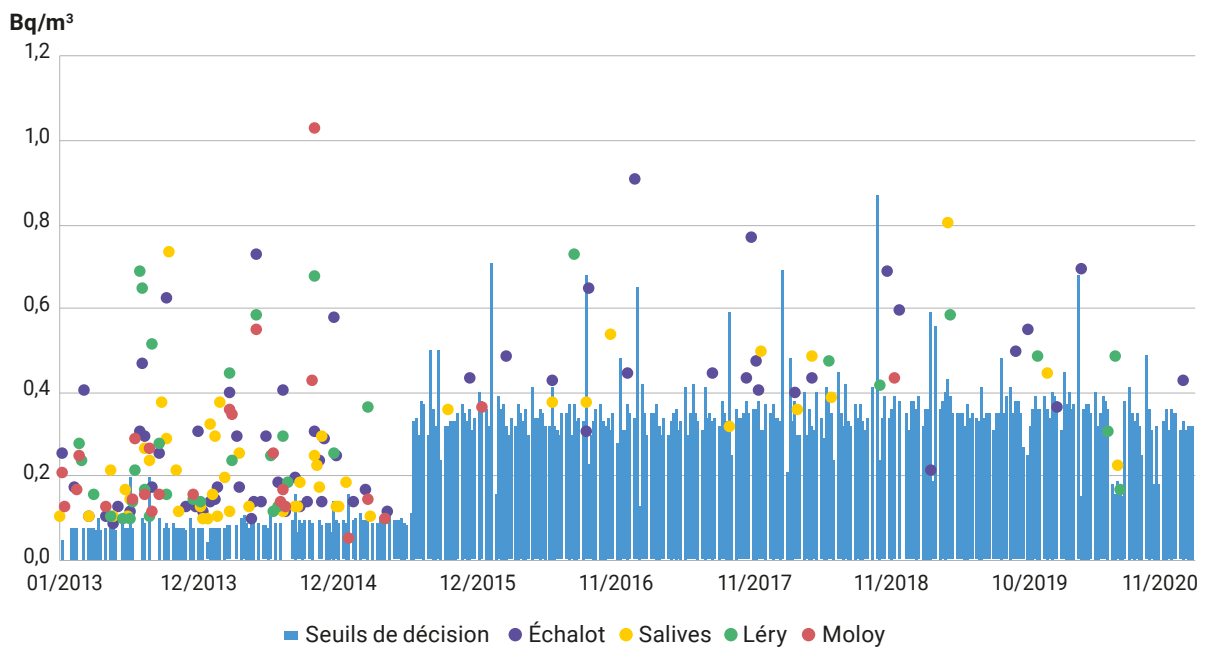
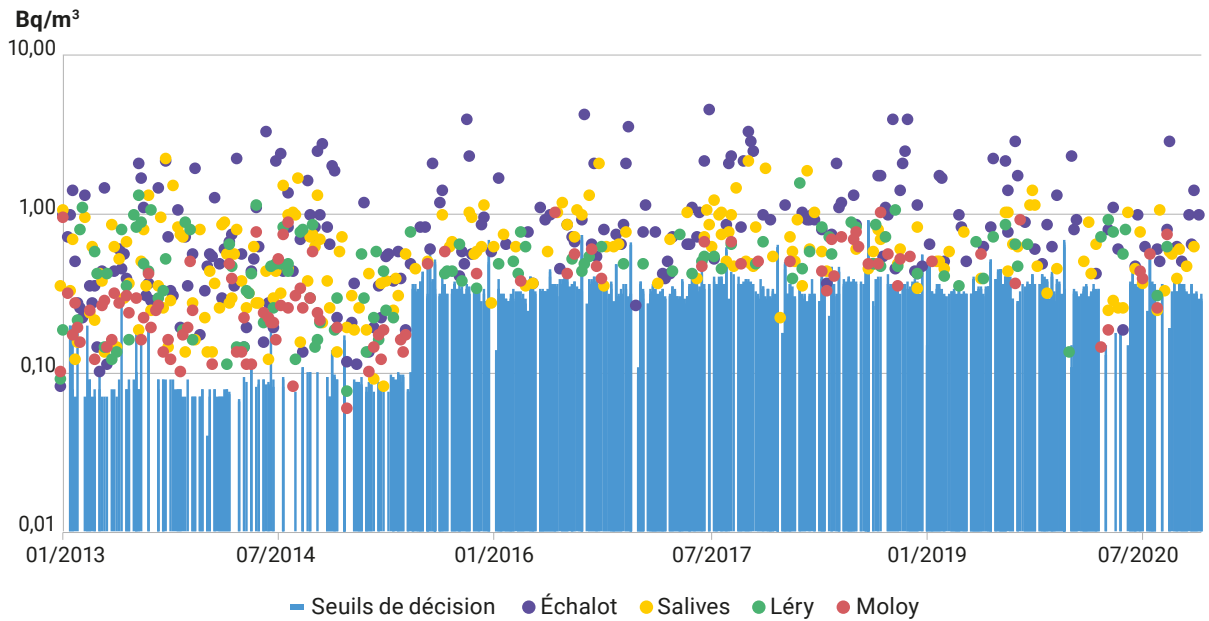
La figure 3 montre que si une forte variabilité est observée, les gammes d'activités sont assez constantes dans le temps, avec des activités proches, en accord avec la constance des rejets au cours des 20 dernières années. Ces niveaux de tritium dans l'air sont très supérieurs au bruit de fond actuel du tritium atmosphérique hors influence d'une installation nucléaire qui est de l'ordre de 0,01 Bq/m³ d'air pour la vapeur d'eau tritiée.

TABLEAU 2 / ACTIVITÉS MOYENNES ET MAXIMALES DU TRITIUM SOUS FORME DE VAPEUR D'EAU (HTO) ÉTABLIES SUR LA BASE DES RÉSULTATS DE MESURE SIGNIFICATIFS OBTENUS HEBDOMADAIREMENT DANS L'AIR AUTOUR DU SITE DE VALDUC

	HTO (Bq/m ³) Données CEA		HTO (Bq/m ³) Données IRSN	
	Valeur moyenne	Valeur maximale	Valeur moyenne	Valeur maximale
Moly	- *	1,0	-	-
Échalot	0,7	3,9	-	-
Léry	- *	1,5	-	-
Salives	- *	1,8	0,26	0,86

* Dans ce bilan radiologique, une moyenne n'est calculée que si le taux de valeurs significatives (supérieures au seuil de décision) est au moins de 50 %, ce qui n'est pas le cas des résultats de mesures de l'activité de l'air en tritium sur les stations de Léry, Moly et Salives (cf. chapitre 9 d'annexes).

FIGURE 3 / ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS L'AIR SOUS FORME DE VAPEUR D'EAU (HTO, en haut)
 ET SOUS FORME GAZ (HT et autres composés organiques gazeux tritiés, en bas)
 MESURES À FRÉQUENCE HEBDOMADAIRE DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE VALDUC (Bq/m³)



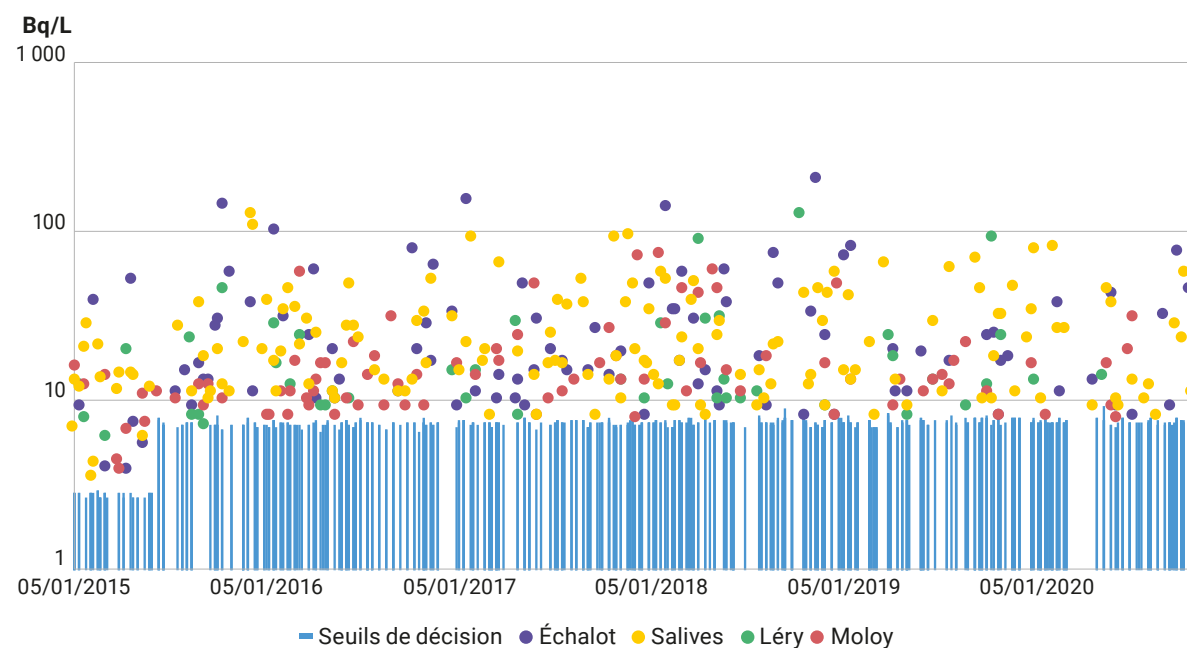
Des collecteurs d'eau de pluie permettent de suivre, sur ces mêmes communes, l'activité en tritium de l'eau de pluie dont la moyenne annuelle, sur la période 2018-2020 et pour les 4 stations, s'établit à 24,5 Bq/L, très proche de celle calculée pour la période 2015-2017. Les moyennes calculées pour chaque station ne mettent pas en évidence de différences marquantes entre les communes situées au nord et celles situées au sud, comme cela avait pu être souligné pour la

période 2015-2017. Toutefois, comme pour l'activité du tritium dans l'air, c'est sur la station d'Échalot que l'activité maximale dans l'eau de pluie a été mesurée en novembre 2018, avec 206 Bq/L (figure 4). Ces mesures dans l'eau de pluie sont cohérentes avec celles dans l'air présentées précédemment (une activité volumique de 0,01 Bq/m³ d'air correspond, dans une atmosphère standard, à une activité de 1 Bq/L d'eau).

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

Commune		Moyenne (Bq/L)	Maximum (Bq/L)
Salives	Nord	25,8	81,0
Échalot		33,7	206,0
Léry	Sud	26,7	125,0
Moloy		21,1	74,0

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



Autour du site de Valduc, des mesures de tritium libre (HTO de l'eau libre contenue dans les végétaux), sont effectuées mensuellement dans l'herbe, d'avril à octobre. La figure 5 souligne la concordance entre les activités mesurées dans l'eau de pluie et celles des végétaux. En effet, ces activités de HTO dans les végétaux sont représentatives des activités en tritium dans l'atmosphère au cours des heures précédant le prélèvement. Les niveaux et les gammes de variabilité des activités de tritium dans l'herbe (HTO) et dans l'eau de pluie sont similaires. La valeur moyenne pour les 4 stations sur la période 2018-2020 est de 29,8 Bq/kg frais d'herbe, très proche de celle de l'eau de pluie. Comme au cours de la période précédente, c'est sur la commune d'Échalot que la valeur maximale a été mesurée : 116 Bq/kg frais d'herbe.

Les activités en tritium libre (HTO) du lait de vache prélevé autour du site varient de manière importante comme celles de l'eau de pluie et de l'herbe.

La figure 6 montre la bonne concordance entre les activités mesurées dans l'herbe et celles mesurées dans le lait. L'activité moyenne en tritium du lait sur la période considérée est de 15,5 Bq/L, avec une valeur maximale de 24 Bq/L dans un échantillon prélevé sur la commune de Salives, au cours du mois de juin 2018. Très logiquement les activités mesurées dans le lait sont plus faibles que celles de l'herbe. Ceci est lié au fait que les animaux sont exposés au tritium par inhalation, voie transcutanée et surtout par ingestion de fourrages et d'eau d'abreuvement. Certaines composantes de l'alimentation des bovins (fourrages ou eau) peuvent se trouver moins marquées en tritium que l'herbe locale.

On constate enfin qu'à distance équivalente au site, l'activité moyenne du tritium mesurée dans ces différents types d'échantillons est similaire quel que soit l'azimut, ce qui témoigne de l'absence de vent dominant autour du site de Valduc.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS DU TRITIUM MESURÉES DANS L'EAU DE PLUIE (Bq/L) ET DANS L'HERBE (Bq de tritium libre/kg frais) À PROXIMITÉ DU SITE DE VALDUC

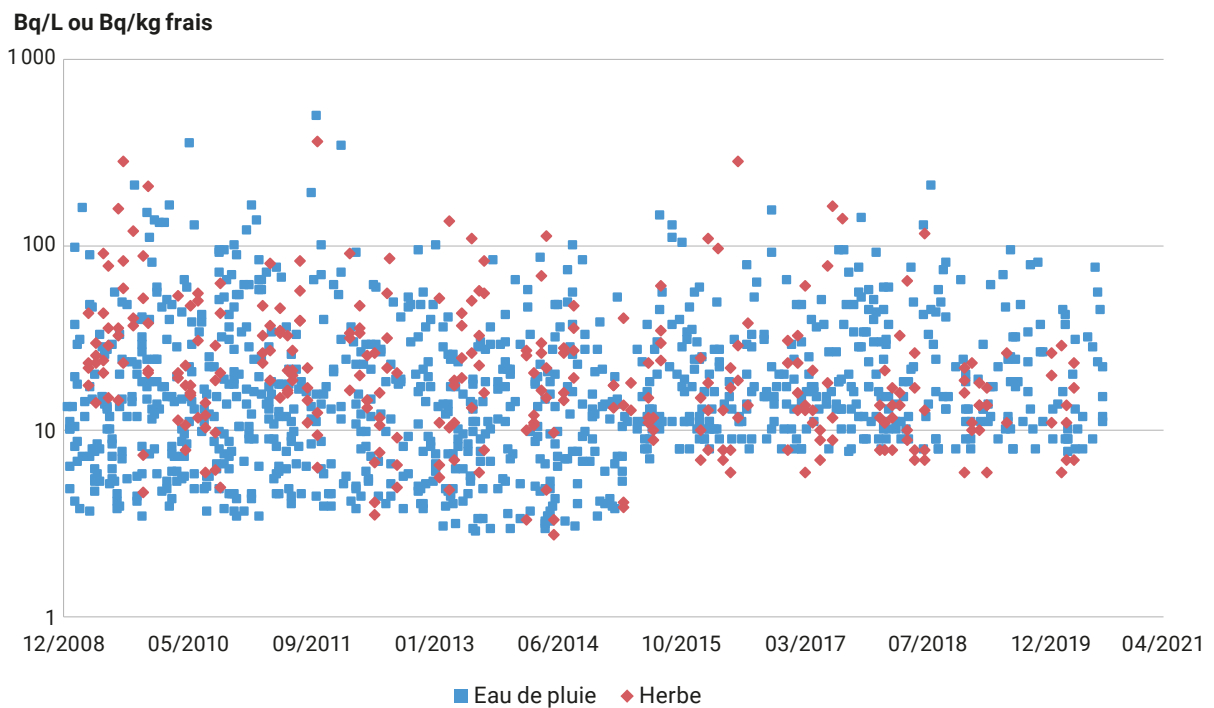
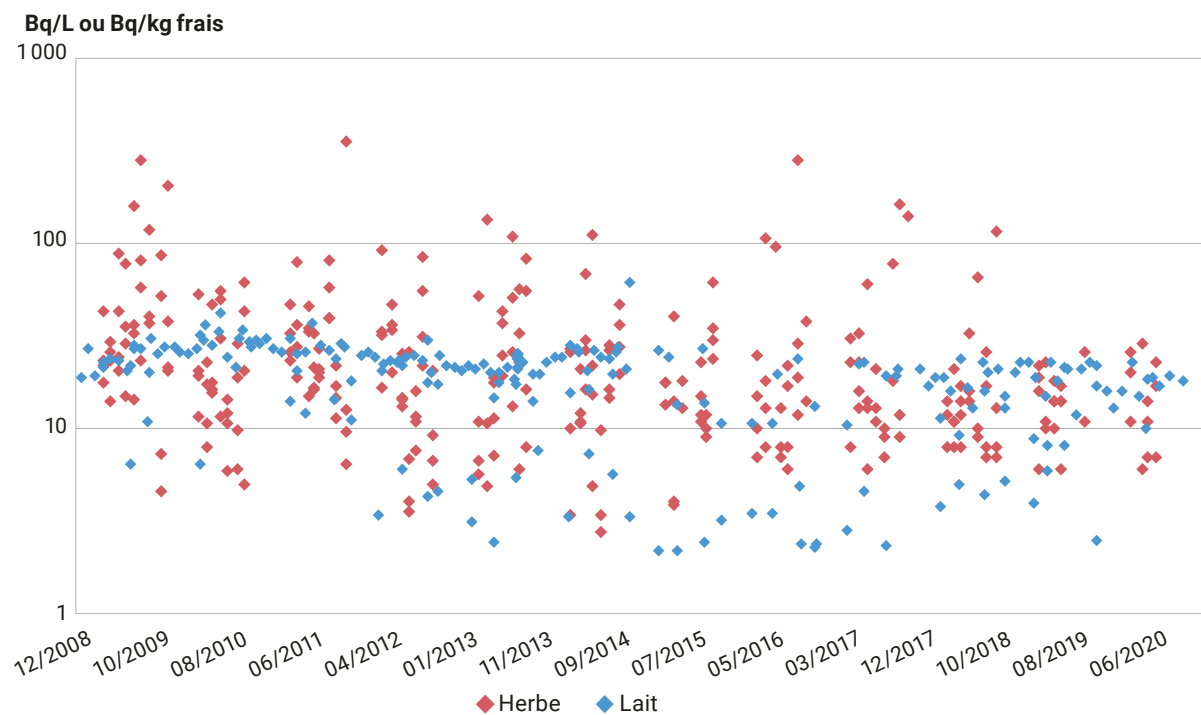


FIGURE 6 / ACTIVITÉS DU TRITIUM LIBRE MESURÉES DANS LE LAIT (Bq/L) ET DANS L'HERBE (Bq de tritium libre/kg frais) À PROXIMITÉ DU SITE DE VALDUC



Quelques prélèvements de denrées (blé, salades), réalisés annuellement sur les communes aux alentours du site, ont mis en évidence une activité variant de 3,3 à 6,2 Bq/kg frais. Ces activités sont supérieures au bruit de fond du tritium dans les denrées qui est aujourd'hui de l'ordre de 1 Bq/kg frais.

Les résultats des mesures des feuilles d'arbres, prélevées à des distances croissantes depuis le site de Valduc jusqu'à la commune de Pralay, sont présentés dans la figure 7. Ils montrent qu'à près de 30 km du site, les activités en tritium peuvent encore dépasser de plus de cinq fois le bruit de fond radiologique de ce radionucléide, confirmant ainsi que les rejets de tritium du centre de Valduc influencent l'environnement terrestre du site sur plusieurs dizaines de kilomètres.

Une surveillance des nappes phréatiques est effectuée par l'IRSN sur des échantillons d'eau prélevés au niveau des résurgences des sources de la Coquille, de la Galopine, de Prélard, de Prégelan et des alimentations publiques : fontaine publique à Minot et à Moley, et lavoir à Meix (figure 8). Les activités en tritium mesurées vont de 1,6 à 60 Bq/L d'eau tandis que la moyenne s'établit à 21,2 Bq/L. Les activités les plus importantes ont été mesurées dans les prélèvements effectués dans la source Prégelan à Salives et dans la commune du Meix avec des moyennes respectivement de 50,6 Bq/L et 19,8 Bq/L d'eau. Concernant les autres sources d'eau, le marquage en tritium oscille entre 1,64 Bq/L et 9,0 Bq/L.

Depuis 2020, le CEA Valduc procède au prélèvement et à la mesure d'échantillons d'eau de nappes phréatiques en trois points au sud du site, dans la combe du ruisseau du Noirvau. Les premiers résultats d'analyse témoignent d'un marquage de la nappe en tritium avec des activités comprises entre 35 et 127 Bq/L.

FIGURE 7 / ACTIVITÉS DU TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ MESURÉES DANS LES FEUILLES D'ARBRES PRÉLEVÉES DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE VALDUC (Bq/kg sec de feuilles) ENTRE 2012 ET 2019

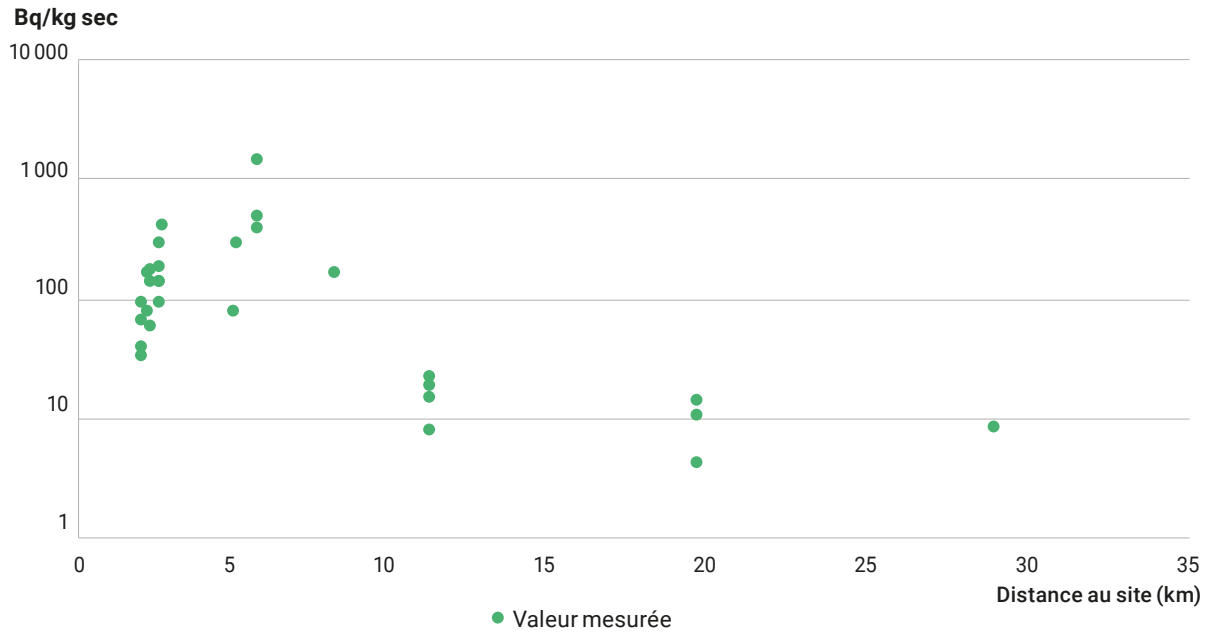
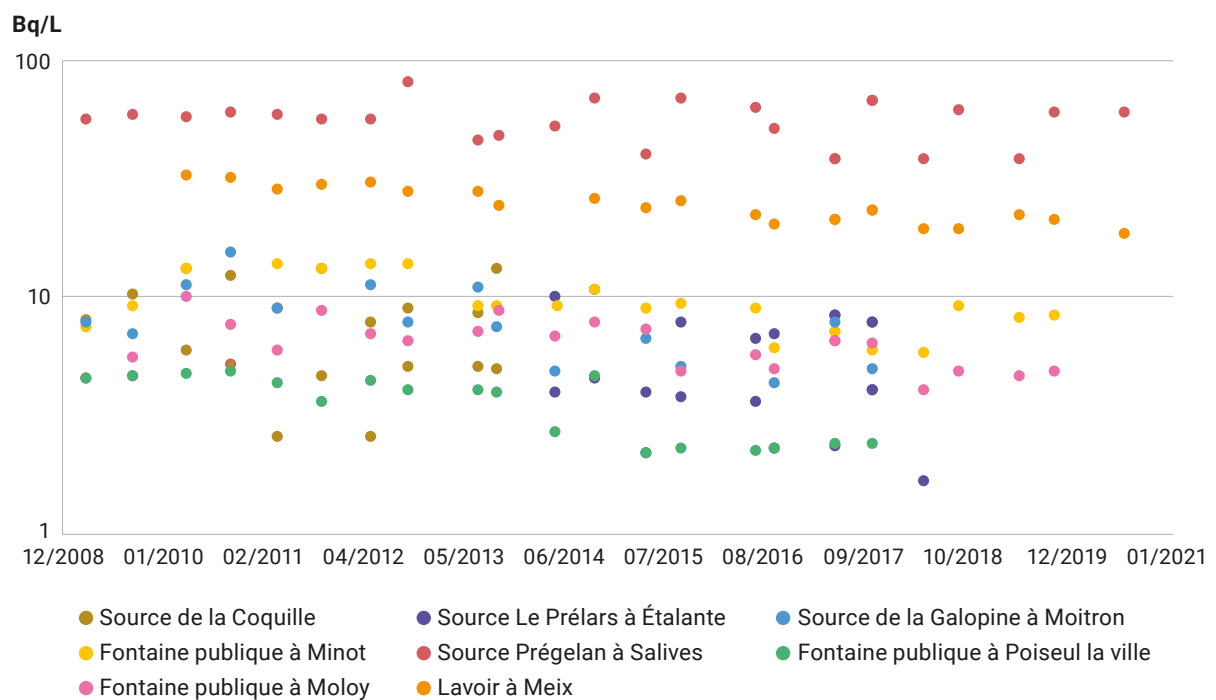


FIGURE 8 / ACTIVITÉS EN TRITIUM MESURÉES DANS LES EAUX SOUTERRAINES PRÉLEVÉES À PROXIMITÉ DU SITE DE VALDUC (Bq/L)



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 en 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 (figures 10 et 11). Cette évolution globale va de pair avec celle des rejets atmosphériques (figure 2 p. 267).

Dans le grand étang, l'activité moyenne en tritium de l'eau est de 143,6 Bq/L, inférieure à la moyenne calculée sur la période précédente. Ce plan d'eau nourrit le ruisseau du Noirvau qui se jette ensuite dans la Douix comme le montre la figure 9. Cela se traduit par un marquage moins important de la Douix par dilution des activités du Noirvau (figure 10). Ainsi, les activités maximales mesurées dans le Noirvau et dans la Douix ont été de 114,0 Bq/L et 23,7 Bq/L respectivement, légèrement inférieures à celles mesurées sur la période 2015-2017. Notons que les mesures réalisées par l'IRSN et par le CEA dans le grand étang de Valduc fournissent des résultats quasi identiques.

Au sud du site, le Noirvau et la Douix se jettent ensuite dans l'Ignon. L'activité moyenne du tritium mesurée dans ces trois rivières est de 99,7 Bq/L, de 20,9 Bq/L et 14,1 Bq/L respectivement. À l'est coule la rivière La Tille avec une activité maximale en tritium de 29,5 Bq/L et une activité moyenne de 27,5 Bq/L d'eau. Ainsi, la surveillance des cours d'eau autour du site met en évidence une influence des rejets de tritium du site ; cette influence n'est pas perceptible au niveau du Revinson et de la Seine (à l'ouest du site), pour lesquels tous les résultats de mesure sont inférieurs au seuil 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 1 Bq/L).

FIGURE 9 / PLAN DES COURS D'EAU DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DU CEA DE VALDUC ET DES EAUX DE SURFACES SURVEILLÉES

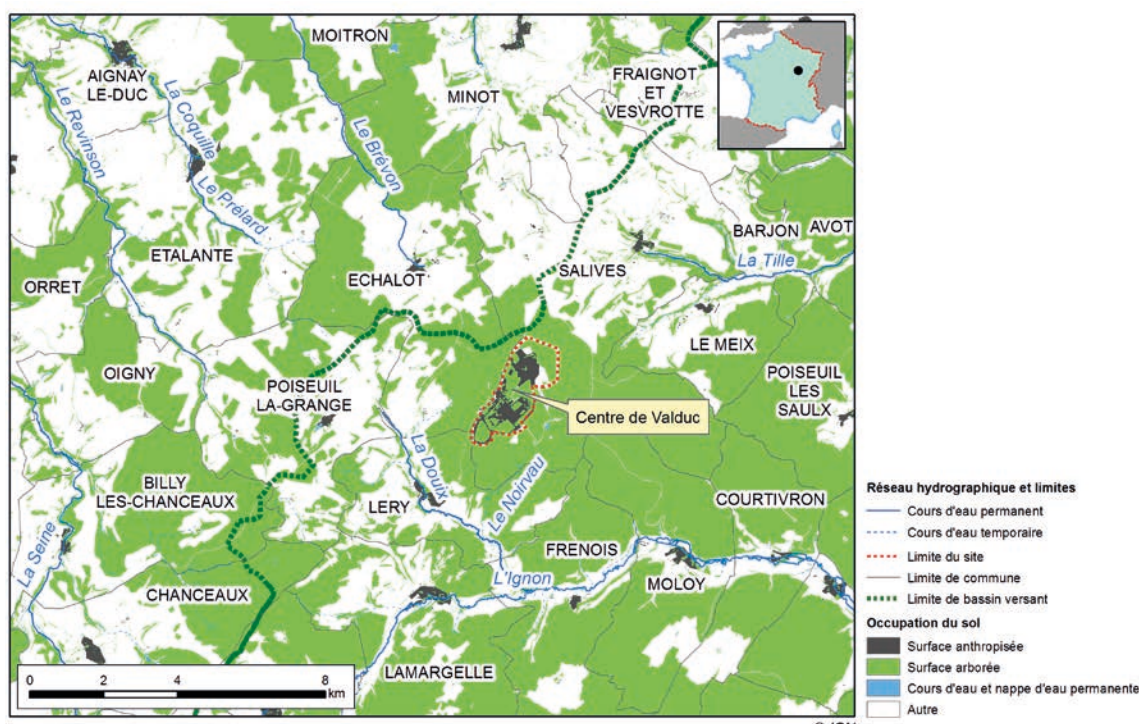


FIGURE 10 / ACTIVITÉS EN TRITIUM MESURÉES DANS LES EAUX DE SURFACE PRÉLEVÉES À PROXIMITÉ DU SITE DE VALDUC (Bq/L) DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SEINE

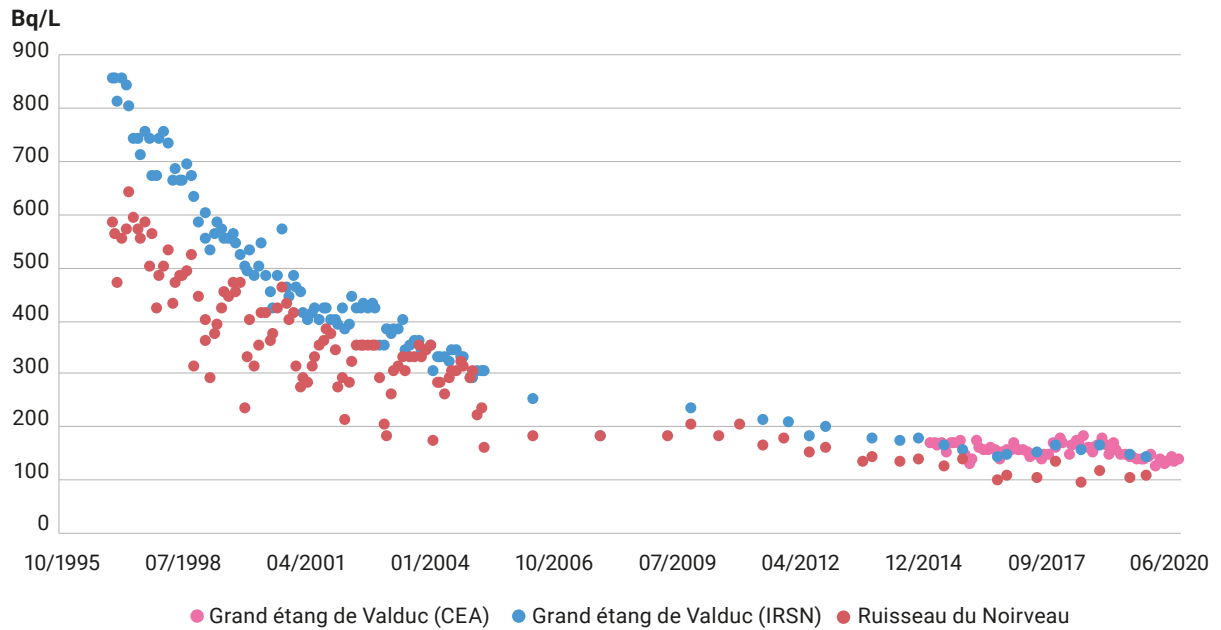


FIGURE 11 / ACTIVITÉS EN TRITIUM MESURÉES DANS LES EAUX DE SURFACE PRÉLEVÉES À PROXIMITÉ DU SITE DE VALDUC (Bq/L) DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SAÔNE

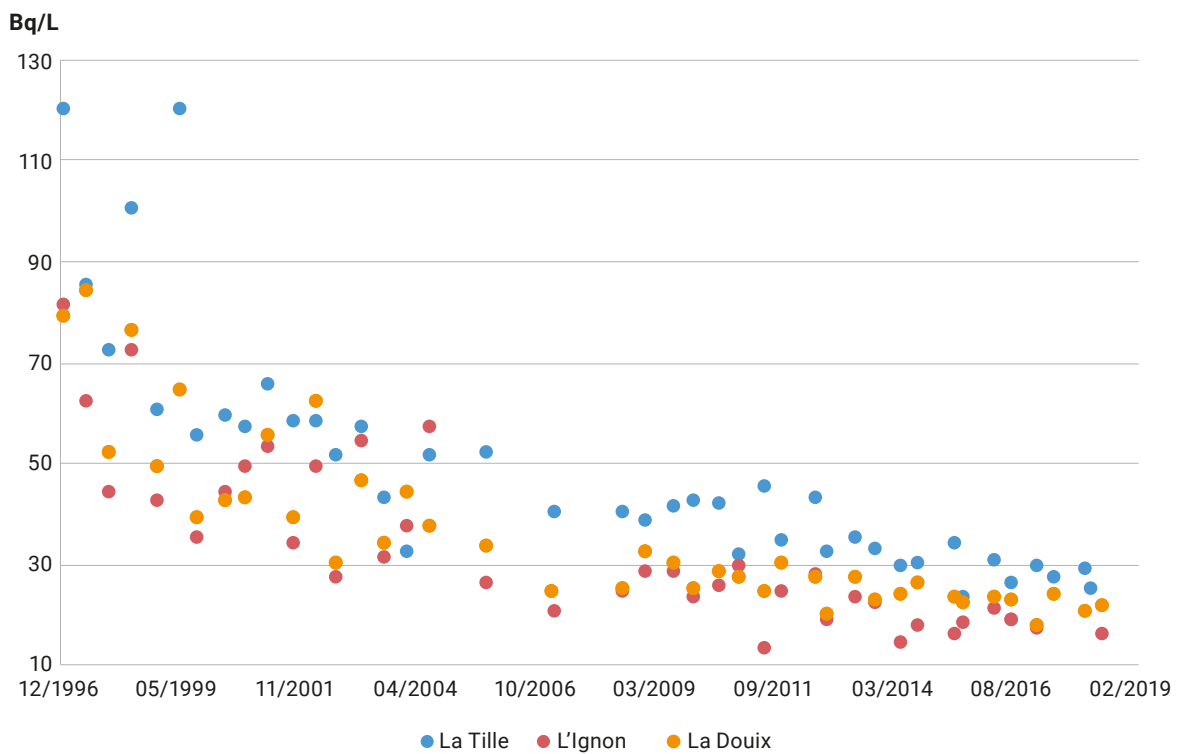
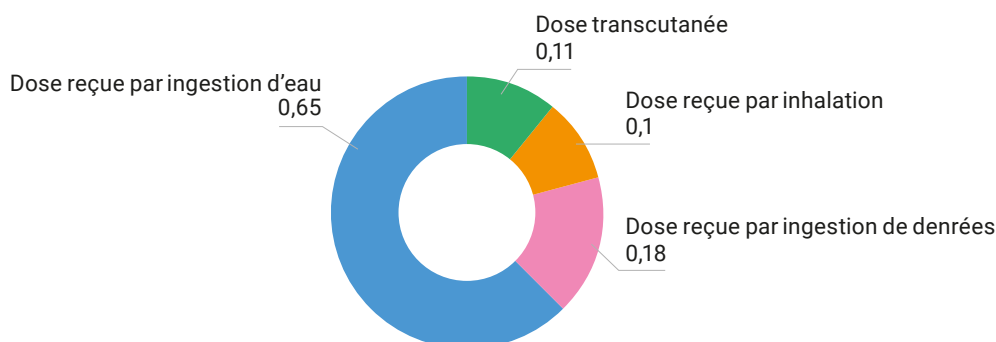


FIGURE 12 / ESTIMATION DES DOSES LIÉES AUX REJETS ATMOSPHÉRIQUES EN TRITIUM DU CEA DE VALDUC : CONTRIBUTION DES VOIES D'ATTEINTE À LA DOSE EFFICACE TOTALE ($\mu\text{Sv}/\text{an}$)



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 du tritium dans l'air, les mesures montrant que les activités des denrées sont en équilibre avec celle 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 en routine ; 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 (seulement 7 % des analyses ont permis de mesurer le tritium sous forme gazeuse). Les doses ainsi estimées sont de 0,22 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour la commune d'Échalot et 0,075 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour la commune de Salives (elle était de 0,14 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour la période précédente).

Pour estimer la dose due à l'incorporation de tritium par ingestion d'eau, il a été considéré la consommation de l'eau de source de Prégelan qui présente les activités en tritium les plus élevées et une moyenne de 50,6 Bq/L sur la période 2018-2020. La dose ainsi obtenue est d'environ 0,65 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

Concernant l'ingestion de denrées produites localement, c'est le régime de consommation pour les zones rurales (cf. chapitre 9 d'annexes) qui a été utilisé. La dose obtenue est de 0,18 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour Échalot et 0,06 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour Salives.

La dose moyenne totale liée aux rejets tritiés du site se situe donc autour de 1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour la commune d'Échalot (figure 12 avec les contributions des voies d'exposition). Cette dose est du même ordre de grandeur que celle évaluée par l'exploitant à 0,49 μSv pour l'adulte et présentée dans le *Livre Blanc du tritium* pour 2019.

Conclusion

Les résultats des mesures effectuées dans tous les compartiments de l'environnement autour du site de Valduc montrent que seul le tritium marque l'environnement jusqu'à une distance de plusieurs dizaines de kilomètres du site.

L'activité mesurée des autres radionucléides ne permet pas de déceler une éventuelle contribution des rejets du CEA. Les niveaux de tritium dans les différents compartiments de l'environnement restent stables et d'une façon générale 10 à 100 fois supérieurs au bruit de fond. Les rejets du CEA de Valduc pourraient conduire en moyenne à une dose efficace de 1,0 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour une personne adulte séjournant une année entière dans l'environnement proche du site. Cette valeur est identique à l'estimation faite dans le précédent bilan radiologique pour la période 2015-2017 ; elle est aussi 1 000 fois inférieure à la limite d'exposition fixée pour le public à 1 mSv/an.

3.5. LES BASES NAVALES NUCLÉAIRES

Description

Quatre ports militaires de la Marine nationale, situés en métropole, abritent des bases navales nucléaires. Ces installations nucléaires présentent la spécificité de jouxter d'importantes agglomérations : Toulon (figure 2), Brest et Cherbourg.

Elles sont chargées de l'accueil et du soutien logistique de proximité de bâtiments militaires stationnés ou de passage dans ces ports. Sur ces sites, les chaufferies nucléaires des sous-marins (figure 1) ou du porte-avions sont toujours à l'arrêt ou à très faible puissance.

Port militaire de Cherbourg

Le port militaire de Cherbourg (Manche), avec au sein des établissements de la DGA (Direction générale de l'armement), est principalement dédié à la construction et au démantèlement de sous-marins à propulsion nucléaire (d'attaque et lanceurs d'engins).

Par ailleurs, la base navale de Cherbourg peut accueillir des bâtiments et des sous-marins à propulsion nucléaire au mouillage comme à quai.

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 sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE), les sous-marins nucléaires d'attaque (SNA), ainsi que le porte-avions « Charles de Gaulle ».

La base opérationnelle de l'Île Longue, au sud de la base navale de Brest, est le site de mise en œuvre des quatre SNLE, composante océanique stratégique de la dissuasion. Certaines phases de l'entretien des SNLE sont réalisées sur ce site ainsi que l'embarquement de leurs seize missiles intercontinentaux.

FIGURE 1 / MISE EN CALE SÈCHE D'UN SOUS-MARIN NUCLÉAIRE LANCEUR D'ENGINS (SNLE)



© Marine nationale

Port militaire de Toulon

Le port militaire de Toulon (Var) est la principale base navale française. En effet, elle abrite 70 % de la flotte française, dont sept bâtiments à propulsion nucléaire : les six SNA et le porte-avions « Charles de Gaulle ».

Les rejets radioactifs

Certaines activités nucléaires pratiquées dans les ports militaires, telles que le maintien en condition opérationnelle des navires à propulsion nucléaire ou 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.

FIGURE 2 / BASE NAVALE DE TOULON



© Marine nationale

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.

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 V2) et le réseau Téléray de l'IRSN ainsi que par des prélèvements d'air et d'eau de pluie.

La surveillance des ports militaires est également assurée au travers de nombreux prélèvements périodiques dans le milieu aquatique (eau de mer, sédiments, sables, crustacés, mollusques, poissons, algues) sur lesquels des mesures de l'activité bêta globale, du tritium et par spectrométrie gamma sont réalisées.

Dans le milieu terrestre, des prélèvements de végétaux (herbe, feuilles d'arbre) et des principales productions agricoles (fruits, légumes) sont réalisés sous les vents dominants, et complétés par des prélèvements de la couche superficielle des terres. 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 / PRÉLÈVEMENT D'EAU DE MER À CHERBOURG

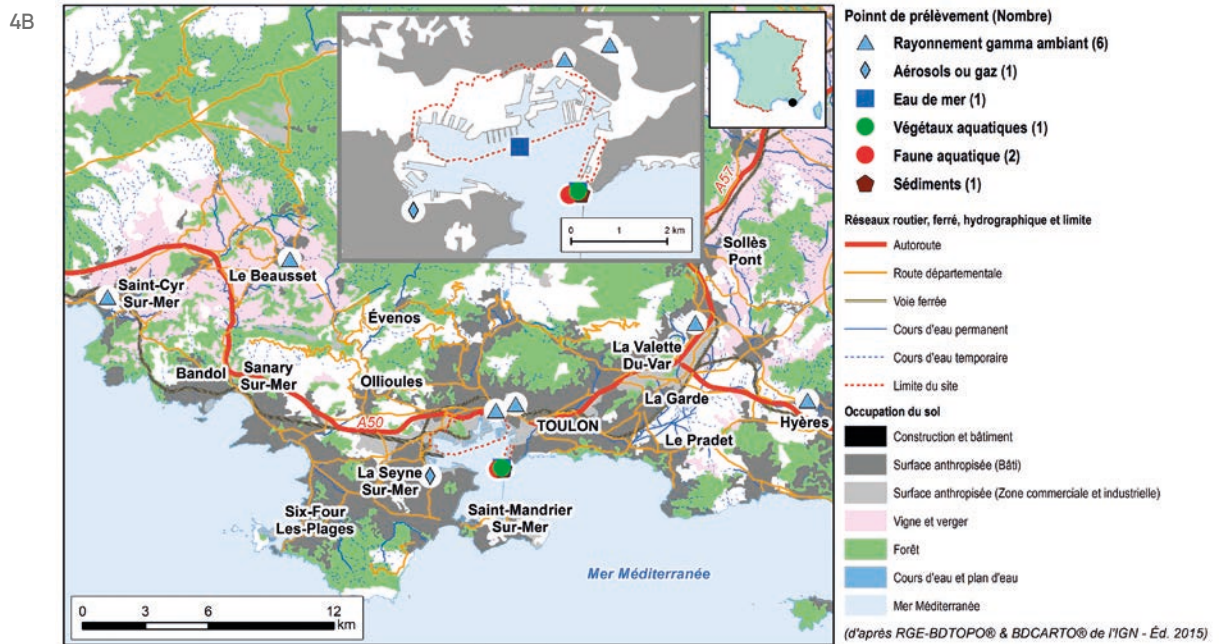
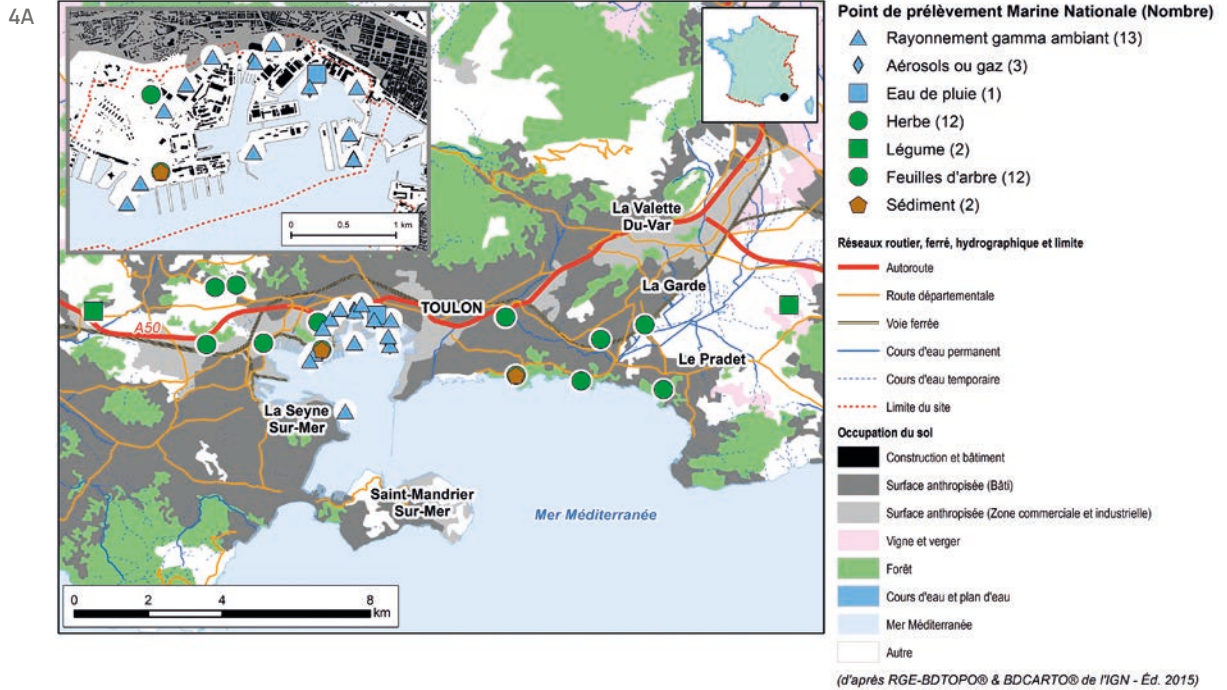


© Marine nationale

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"> 26 balises à l'intérieur du site, 4 balises à l'extérieur du site au Fort de Six-Fours, Fort de la Croix Faron et au Fort du Cap brun, Fort de l'Équilette 	<ul style="list-style-type: none"> 8 balises dans l'environnement : Barjols, Hyères, La Farlede, Le Beausset, Rians, St-Cyr-sur-Mer, Toulon, Toulon-Arsenal
Gaz rares et aérosols atmosphériques	<ul style="list-style-type: none"> mesure différée : 3 points de prélèvement sur site : activités β globales sur filtre (quotidien), spectrométrie γ si β global > 2 mBq/m³ mesure en continu : 14 balises de mesure d'activité volumique des gaz et des aérosols (α, β et γ) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement à la Seyne-sur-Mer : spectrométrie γ (hebdomadaire)
Tritium dans l'air	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement sur site : tritium dans l'air HTO - HT (hebdomadaire) 	
Eau de pluie	<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement sur site : activités α et β globales, tritium (à chaque occurrence) 	
Sol	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement Toulon ouest – Ollioules et Toulon ouest – Le Pradet : spectrométrie γ (annuel) 	
Eau de mer		<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement, Tour Royale : tritium (mensuel), spectrométrie γ (annuel)
Sédiments		<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement, Tour Royale : spectrométrie γ (annuel)
Faune aquatique		<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement, Tour Royale : moules, spectrométrie γ, Pu, Am, carbone-14, tritium lié (annuel), poissons, spectrométrie γ, Pu, Am, carbone-14, tritium lié (annuel)
Végétaux aquatiques		<ul style="list-style-type: none"> 1 point de prélèvement, Tour Royale : algues, spectrométrie γ, Pu, Am, tritium lié (annuel)
Herbe	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement Toulon ouest et Toulon est : spectrométrie γ (mensuel) ; carbone-14 (annuel) et tritium (eau de distillation) trimestriel 	
Feuilles d'arbre	<ul style="list-style-type: none"> 2 points de prélèvement Toulon ouest et Toulon est, 2 espèces lentisques et cyprès : spectrométrie γ (mensuel), carbone-14 (annuel) 	
Fruits et légumes	<p>2 points de prélèvement, Toulon ouest et Toulon est :</p> <ul style="list-style-type: none"> 4 espèces de légumes prélevées (salade, tomate, pomme de terre et courgette) : spectrométrie γ (annuel), tritium (eau de distillation) sur salade, tomates, courgettes (annuel) et carbone-14 annuel sur salade ; jus de raisin issu de productions viticoles : spectrométrie γ (annuel). 	

FIGURE 4 / PLAN DE SURVEILLANCE DU SITE DE TOULON DE LA MARINE NATIONALE (4A) ET DE L'IRSN (4B)



Influence des sites sur l'environnement

Port militaire de Cherbourg

Le tritium

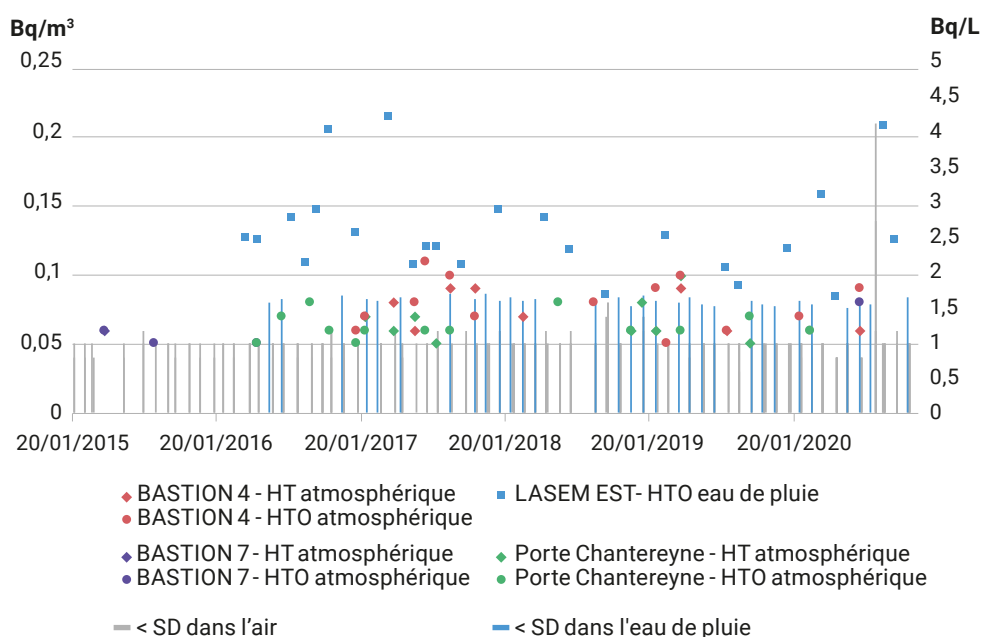
La situation radiologique du port militaire de Cherbourg, sous influence des rejets du centre de traitement des combustibles usés de La Hague, revêt une complexité dans l'analyse des données et la discrimination de l'origine des marquages, notamment pour le tritium, présent dans le spectre de rejet de ces deux sites.

Le tritium atmosphérique, présent sous forme d'hydrogène tritié (HT) et de vapeur d'eau (HTO), est prélevé par des barboteurs et mesuré à une fréquence hebdomadaire en trois points autour de la base navale. Le niveau de tritium atmosphérique (HTO et HT confondus) observé au cours de la période 2018-2020 est similaire à celui mesuré sur la période précédente (2015-2017) avec un taux de détection d'activités supérieures au seuil de décision métrologique (de 0,05 Bq/m³), de 15 % contre 23 %.

Cette gamme de valeurs significatives, qui oscille entre 0,05 et 0,11 Bq/m³, est supérieure au bruit de fond hors influence des installations nucléaires, qui se situe entre 0,005 et 0,01 Bq/m³. Les activités en tritium mesurées depuis 2016 sur les eaux de pluie, qui se situent quant à elles entre 1,71 et 4,19 Bq/L, sont proches quoique légèrement supérieures au bruit de fond radiologique qui est de l'ordre de 1 Bq/L dans une gamme allant de 0,5 à 2 Bq/L.

Ces activités de tritium dans l'air et dans les eaux de pluie se traduisent par un faible marquage de l'environnement terrestre. Ainsi, les activités mesurées sont supérieures au seuil de décision métrologique dans 2/3 des cas et comprises entre 1,36 et 3,69 Bq/kg frais pour le tritium libre dans l'herbe et les légumes et jusqu'à 5,51 Bq/kg frais dans les ajoncs ; ces activités sont proches quoique supérieures au bruit de fond (de moins de 0,5 à 2 Bq/kg frais), en cohérence avec celles mesurées dans l'air et dans l'eau de pluie. Par ailleurs, il est à noter que le tritium n'a pas été détecté dans le lait depuis 2018.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES EN 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 2015 ET 2020



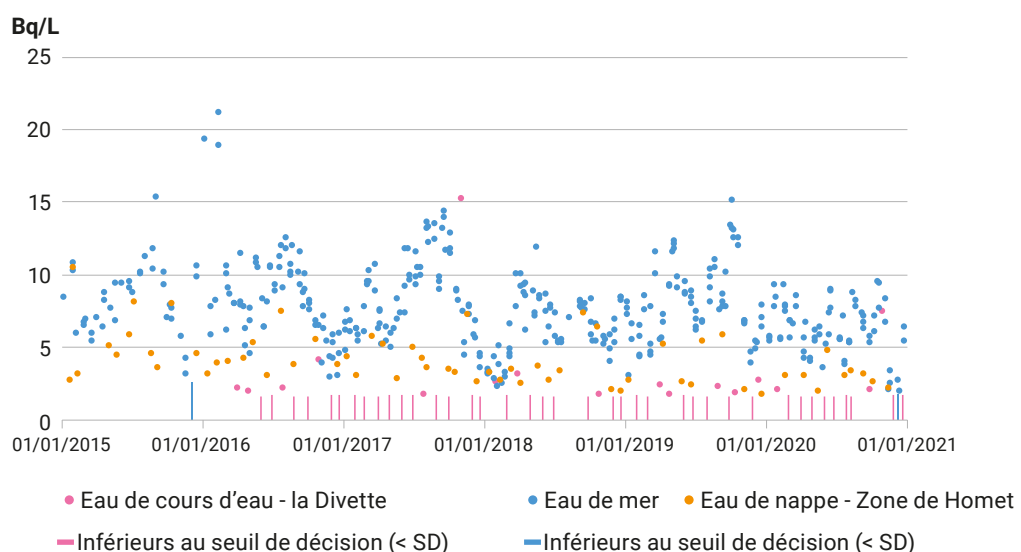
Les valeurs en tritium mesurées dans l'eau de mer, en différents points autour de la base navale, révèlent des activités variant entre 1,99 et 15,2 Bq/L pour ces trois dernières années, quasiment toujours significatives et très supérieures au niveau de référence se situant, pour cette matrice, entre 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. Depuis fin 2019, les résultats semblent montrer une plus faible disparité et une tendance à la diminution. Les mesures réalisées sur les eaux saumâtres de la nappe situées sous la zone du Homet, au nord-est du site, montrent également que le marquage tend à diminuer. Ces activités étant dues à un apport par l'eau de mer, cette tendance est à relier à l'observation faite précédemment sur les niveaux dans l'eau de mer en 2020.

La Divette, cours d'eau se jetant dans la petite rade de Cherbourg, fait également l'objet d'une surveillance par prélèvements. Les résultats, dont 1/3 sont supérieurs au seuil de décision métrologique depuis 2018, montrent un très léger marquage avec des valeurs variant aux alentours de 2 Bq/L, et très sporadiquement sur deux échantillons depuis 2015, de l'ordre de la dizaine de Bq/L. 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.

Le tritium, largement présent dans le milieu aquatique, 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 2,1 et 7,7 Bq/kg frais pour le tritium libre et entre 0,5 et 2,16 Bq/kg frais pour le tritium organiquement lié, confirment ce transfert.

Ainsi, le milieu 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 EN TRITIUM LIBRE DANS LES EAUX DOUCES ET DE MER À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE CHERBOURG ENTRE 2015 ET 2020 (Bq/L)



Carbone-14

Les poissons, les crustacés et les mollusques prélevés à proximité des installations de la Marine nationale présentent des activités massiques variant entre 23 et 77 Bq/kg frais. Ces valeurs nettement supérieures au bruit de fond de ce radionucléide (18 à 20 Bq/kg frais), sont cohérentes avec celles observées le long de la côte sous l'influence de La Hague.

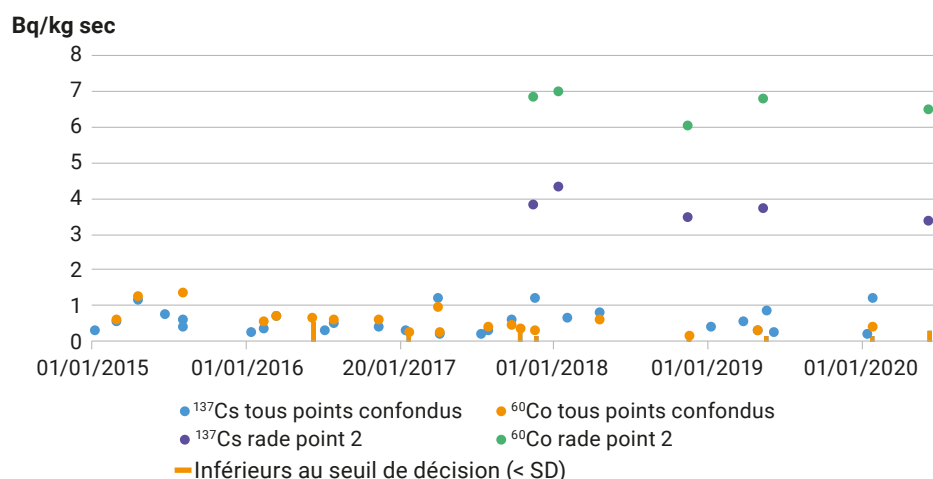
Aucun marquage au carbone-14 n'est mis en évidence dans le compartiment terrestre, les résultats obtenus pour le lait, compris entre 14,2 et 16 Bq/L, sont proches des valeurs de référence du bruit de fond situées aux alentours de 15 Bq/L. Concernant les matrices végétales, l'activité mesurée en 2019 dans un échantillon de légumes se trouve également dans la gamme du bruit de fond (4,13 Bq/kg frais pour un bruit de fond inférieur à une dizaine de Bq/kg frais) ; il en est de même de trois échantillons d'herbes compris entre 89 et 112 Bq/kg sec.

Émetteurs gamma

Le césium-137 est détecté 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 0,8 à 3,88 Bq/kg sec dont 100 % de valeurs significatives), l'herbe (0,009 à 0,75 Bq/kg sec dont 50 % de valeurs significatives) ou les légumes entre 0,019 et 0,09 Bq/kg frais pour lesquels le césium-137 n'a été détecté que 3 fois sur 56 échantillons.

Dans le milieu marin, les algues, les poissons et les mollusques présentent également des valeurs d'activités en césium-137 proches du bruit de fond. Il en est de même pour les sédiments, pour lesquels il est quasiment toujours détecté 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.

FIGURE 7 / ACTIVITÉS EN CESIUM-137 ET COBALT-60 DANS LES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE CHERBOURG ENTRE 2015 ET 2020 (Bq/kg sec)



Le cobalt-60 est détecté dans la moitié des échantillons de sédiment prélevés entre 2018 et 2020 autour de la base navale dans une gamme allant 0,126 à 0,68 Bq/kg sec. Toutefois, comme pour le césium-137, on observe des activités bien plus élevées, de l'ordre de 6 à 7 Bq/kg sec dans la grande rade de Cherbourg. Une étude menée par Orano et par l'IRSN est actuellement en cours visant à comprendre l'origine de ces apports sédimentaires. Cette étude porte d'une part sur l'analyse de carottages réalisés dans la rade de Cherbourg et dans le golfe Normand Breton, et d'autre part sur l'étude des voies de transfert des sédiments et la reconstitution des apports potentiels en radionucléides par l'usine Orano de La Hague.

Le cobalt-60 est plus rarement détecté dans les algues (0,26 à 0,99 Bq/kg sec) et les mollusques (0,12 et 0,15 Bq/kg frais) avec des activités massiques du même ordre de grandeur que celles mesurées le long des côtes depuis le site de La Hague.

À noter qu'un échantillon d'eau de pluie du mois d'octobre 2019 a fait l'objet d'une détection singulière de cobalt-60 avec une activité de $0,043 \pm 0,004$ Bq/L par la Marine nationale, sans que celle-ci ait pu être confirmée et son origine identifiée.

Provenant essentiellement des usines de traitement de combustibles usés de La Hague et de Sellafield, l'iode-129 est systématiquement détecté dans les prélèvements d'algues, indicateurs biologiques sensibles, avec des activités variant entre 14,5 et 45,5 Bq/kg sec, cohérentes avec celles mesurées tout au long du littoral marin depuis le site de La Hague.

Enfin, par deux fois de l'iode-131 a été mesuré au-delà du seuil de décision dans des algues pour ces trois dernières années (2,98 et 3,54 Bq/kg sec). Ce radionucléide, utilisé dans le cadre de diagnostic ou de traitement de cancers notamment, peut être imputable, dans le milieu aquatique, aux émissaires hospitaliers transitant par les usines de traitement des eaux.

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

La détection concomitante des isotopes 238 et 239+240 du plutonium permet parfois 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 entre 2018 et 2020, comme pour la période précédente, une origine industrielle des rejets à l'origine de ce marquage imputable à l'usine de La Hague. L'américium-241 est toujours détecté dans les sédiments avec des activités comprises entre 0,2 et 2,4 Bq/kg sec, en moyenne de 0,05 Bq/kg frais dans les mollusques et de 0,023 Bq/kg frais dans un poisson pêché dans la rade.

Port militaire de Brest et base opérationnelle de l'Île Longue

Le tritium

Durant la période de 2018 à 2020, les mesures du tritium gazeux dans l'atmosphère ont permis d'obtenir 25 % de résultats significatifs dans les échantillons prélevés au plus proche de la base de Brest et du site de l'Île Longue. Les valeurs mesurées sont supérieures à la gamme du bruit de fond (de l'ordre de 0,005 à 0,01 Bq/m³) et témoignent des rejets atmosphériques des installations (figure 8). Il en est de même des résultats des mesures effectuées sur les eaux de pluie dont les activités volumiques sont régulièrement au-dessus de la gamme du bruit de fond (qui est de l'ordre de 1 Bq/L dans une gamme allant de 0,5 à 2 Bq/L) avec des valeurs dépassant ponctuellement 4 Bq/L. Ces activités dans l'air sont cependant trop faibles pour entraîner un marquage du milieu terrestre dont les activités de tritium mesurées restent dans la gamme du bruit de fond (de 0,5 à 2 Bq/L ou Bq/kg frais) : de 1,88 à 2,16 Bq/L sur les 10 % de valeurs significatives obtenues sur les échantillons de lait, de 1,46 à 2,23 Bq/kg frais sur les 22 % de valeurs significatives obtenues sur les végétaux prélevés.

Concernant le tritium dans l'eau de mer, les 15 % de valeurs supérieures au seuil de décision métrologique obtenues sur la période 2018-2020, qui sont comprises entre 0,2 et 3,43 Bq/L, témoignent 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 (figure 9). En revanche, les activités massiques en tritium organiquement lié mesurées entre 2018 et 2020 dans des algues prélevées dans la rade de Brest présentent des activités massiques de 0,068 et 0,177 Bq/kg frais, proches des valeurs rencontrées sur la côte Atlantique sur cette même période, comprises entre 0,05 et 0,2 Bq/kg frais. Aucun marquage lié au fonctionnement de ces installations n'est donc constaté sur ces bioindicateurs.

Pour l'eau douce prélevée à proximité de ces sites, la moyenne des 20 % de mesures significatives (de 3 à 3,3 Bq/L) est également légèrement supérieure à la moyenne hors influence des installations nucléaires.

Carbone-14

L'activité volumique du 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 de 0,05 Bq/m³ (figure 11). Certains résultats de mesure dépassent même le double de cette valeur, traduisant une influence nette des rejets du site.

FIGURE 8 / ACTIVITÉS VOLUMIQUES EN TRITIUM HT ET HTO DANS L'AIR (Bq/m³) ET HTO DANS L'EAU DE PLUIE (Bq/L) À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE BREST ET DE LA BASE OPÉRATIONNELLE DE L'ÎLE LONGUE ENTRE 2015 ET 2020

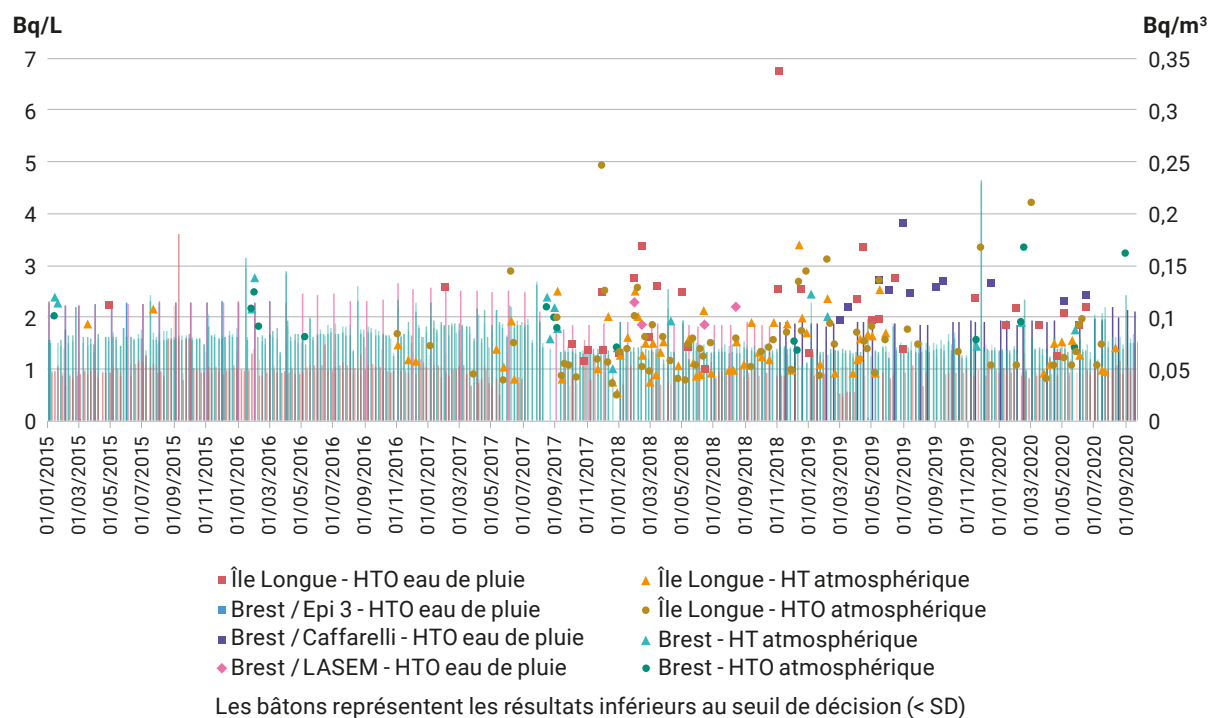
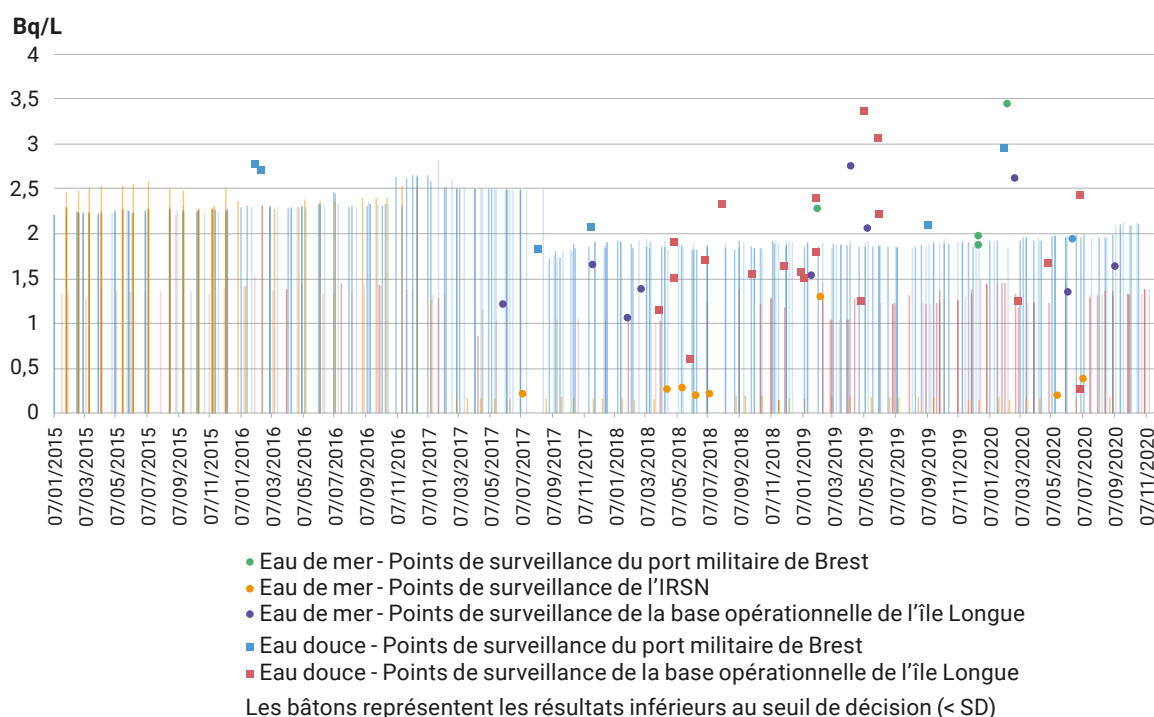


FIGURE 9 / ACTIVITÉS EN TRITIUM LIBRE DANS L'EAU DE MER ET DANS L'EAU DOUCE (Bq/L) À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE BREST ET DE LA BASE OPÉRATIONNELLE DE L'ÎLE LONGUE ENTRE 2015 ET 2020



Dans le milieu aquatique, les données obtenues sur les échantillons d'algues mesurés entre 2018 et 2019 (80,1 et 85,3 Bq/kg sec) sont comparables à celles observées le long de la côte Atlantique (de 65,4 à 82,9 Bq/kg sec) sur la même période.

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 détecté que dans 7 % des cas. Les valeurs mesurées sont toujours proches de la moyenne observée le long de la côte Atlantique, de l'ordre de 0,0008 Bq/L, attribuable aux retombées anciennes liées aux essais nucléaires atmosphériques.

Les résultats de mesure obtenus lors de l'analyse du sédiment, matrice dont la capacité d'intégration est plus importante et dont le taux de détection de valeurs significatives est d'environ 85 %, présentent plus de disparités. En effet, deux gammes de valeurs différentes se distinguent. D'une part, des valeurs proches du bruit de fond du césium-137 dans cette matrice (1 Bq/kg sec), représentatives des retombées anciennes, d'autre part, sur le point de prélèvement proche de l'embouchure de la rivière Penfeld

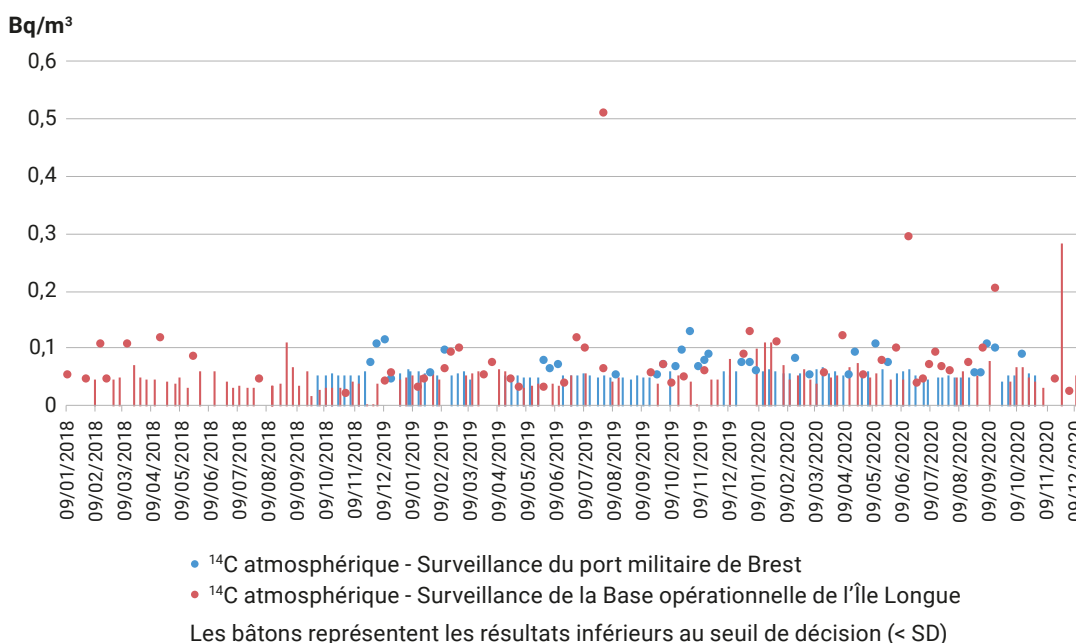
(point A5), des valeurs 2 à 3 fois plus élevées. Ces activités massiques sont attribuables aux apports sédimentaires du cours d'eau également marqués par ces mêmes retombées anciennes..

Pour les poissons et les algues, les activités massiques supérieures au seuil de décision représentent respectivement 35 % et 10 % des résultats ; elles sont cohérentes avec les concentrations de césium-137 obtenues dans ces matrices hors influence d'installations nucléaires, et donc liées aux retombées anciennes.

Il en est de même pour le compartiment terrestre, pour lequel les analyses de sols, bien que disparates (de 0,472 à 17,85 Bq/kg sec), sont comprises dans la gamme de bruit de fond dont la moyenne dans l'ouest de la France est de l'ordre de 7 Bq/kg sec. Très peu de données significatives (1 % des mesures) ont été obtenues lors de la mesure de matrices biologiques animales et végétales. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus précédemment et avec les données de référence acquises hors influence des installations nucléaires.

Le cobalt-60 a été détecté en 2019 dans l'environnement proche de l'île Longue (0,53 ± 0,20 Bq/kg sec). Ce radionucléide artificiel provient des rejets anciens de la base opérationnelle de l'Île Longue.

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 2020



Les plutoniums 238, 239+240

Seuls quelques prélèvements d'algues et de mollusques ont fait l'objet d'analyses des isotopes du plutonium, permettant de mesurer, pour le $^{239+240}\text{Pu}$, des niveaux compris dans les gammes de valeurs relevées hors influence d'installations nucléaires. Les résultats moyens obtenus dans les algues (0,0475 Bq/kg sec) et les moules (0,0038 Bq/kg frais) sont comparables aux données de référence pour ces matrices.

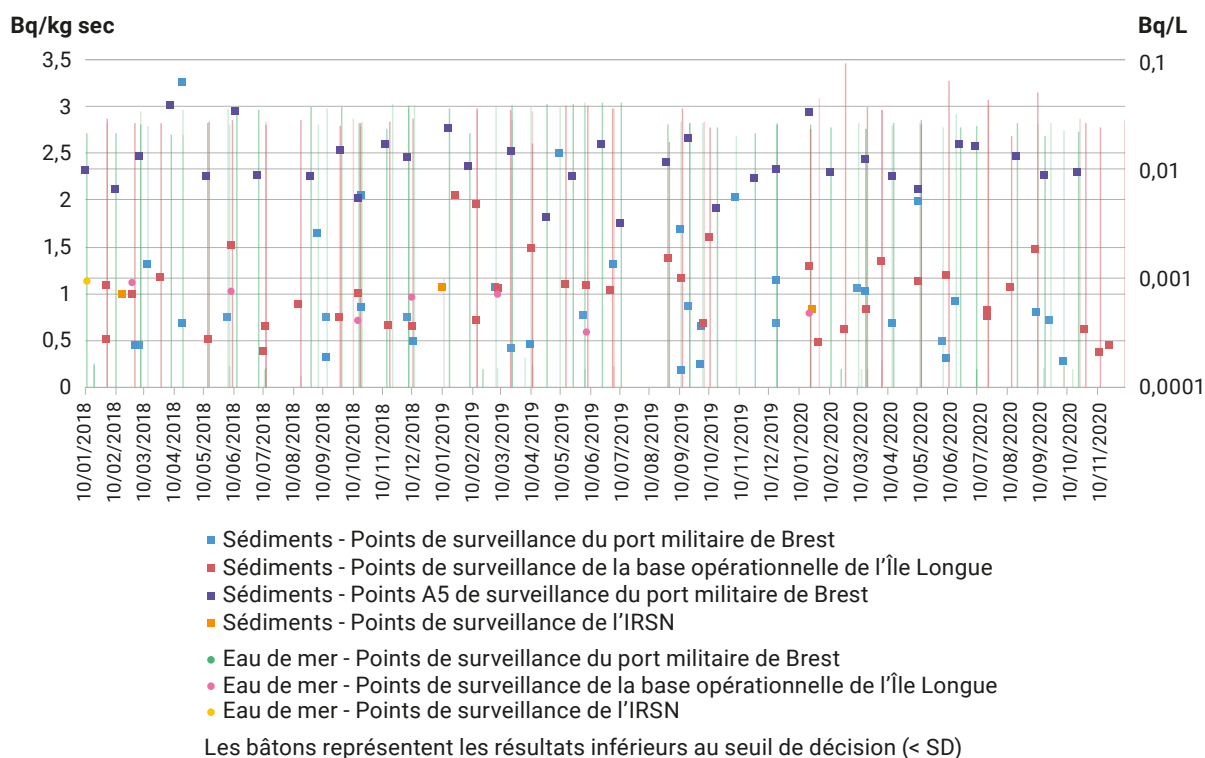
Port militaire de Toulon

Le tritium

La surveillance du compartiment atmosphérique à proximité de la base navale de Toulon ne montre pas de marquage en tritium. En effet, depuis 2018, aucun résultat significatif n'a été relevé sur les échantillons prélevés par le barboteur assigné à la surveillance du site. Parallèlement, un seul échantillon d'eau de pluie présente un résultat significatif pour ce radionucléide ($2,48 \pm 2,15$ Bq/L), qui se situe à la limite supérieure de la gamme du bruit de fond radiologique.

Comme entre 2015 et 2017, seulement 18 % des résultats de mesure en tritium sont significatifs dans l'eau de mer. Bien qu'inférieures à celles ponctuellement mesurées sur la période 2015-2017, les valeurs, comprises entre 0,33 et 1,86 Bq/L, restent supérieures au niveau de référence du bruit de fond du tritium en milieu marin (0,1 à 0,2 Bq/L). Enfin les trois résultats identiques de $0,1 \pm 0,008$ Bq/kg frais en tritium organiquement lié acquis dans des échantillons d'algues en 2018 et 2019 corroborent ce constat.

FIGURE 11 / ACTIVITÉS EN CÉSIIUM-137 DANS L'EAU DE MER (Bq/L) ET LES SÉDIMENTS (Bq/kg sec) À PROXIMITÉ DU PORT MILITAIRE DE BREST ET DE LA BASE OPÉRATIONNELLE DE L'ÎLE LONGUE ENTRE 2015 ET 2020



Carbone-14

Pour ce radionucléide en milieu marin, les activités mesurées, de 9,81 Bq/kg frais pour les moules et de 34,63 Bq/kg frais pour les poissons, sont dans la gamme du bruit de fond radiologique. Dans les algues, les valeurs oscillent entre 75,2 et 77,6 Bq/kg sec et sont conformes aux valeurs basses observées le long de la côte (de 65,4 à 82,9 Bq/kg sec pour la même période).

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 détecté, notamment dans les aérosols pour lesquels la moyenne de 0,148 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour la période 2018-2020, est proche de celle du bruit de fond estimé à 0,122 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Le césium est aussi mesuré dans toutes les composantes de l'environnement terrestre, telles que des graminées, des cyprès ou des lentilles, dans des gammes de valeurs proches de celles du bruit de fond hérité des retombées anciennes. Il en est de même dans le milieu aquatique où des valeurs significatives sont obtenues sur les poissons, les mollusques, les algues et les sédiments.

Les plutoniums 238, 239+240

Des mesures des différents isotopes du plutonium ont été réalisées par l'IRSN en juillet 2018 d'une part sur des moules et d'autre part sur des poissons.

Pour les moules, les activités mesurées sont plus faibles que le niveau de référence et le rapport d'activités isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ calculé (0,04) confirme que l'origine de ce plutonium est attribuable aux retombées des essais atmosphériques nucléaires.

Pour le poisson, la valeur en $^{239+240}\text{Pu}$ de 0,00011 \pm 0,000017 Bq/kg frais est très supérieure à la valeur de référence du bruit de fond qui est de l'ordre de 0,00001 Bq/kg frais. Le rapport d'activités isotopiques $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ est par ailleurs proche de 0,2 et donc du rapport d'activité de 0,3 caractéristique des rejets liquides anciens du site de Marcoule.

Cette différence relevée entre deux espèces d'un même compartiment peut être expliquée par le fait que les moules sont liées à leur lieu de développement alors que les poissons peuvent se déplacer sur de grandes distances ; les poissons qui composent cet échantillon ont potentiellement séjourné à l'embouchure du Rhône où les sédiments peuvent présenter ce rapport d'activités isotopiques. Il est important de noter que, pour cette même année 2018, l'activité en $^{239+240}\text{Pu}$ mesurée dans le sédiment du port militaire (0,260 \pm 0,210 Bq/kg sec) se trouve dans la gamme du bruit de fond de référence (moyenne estimée à 0,2 Bq/kg sec).

FIGURE 12 / PRÉLEVEUR D'EAU DE PLUIE SUR LE PORT MILITAIRE DE TOULON



3.6. SYNTHÈSE DOSIMÉTRIQUE

Sur les trente-six sites français métropolitains où sont exploitées des installations nucléaires de base, trente 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 2018-2020, 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 Malvézi, 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 implantés des INB peut être concernée, mais dans une moindre mesure, même s'il elle se trouve loin en aval.

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 (consommerait régulièrement des denrées produites localement, 2 L/j d'eau du fleuve comme boisson et quelques kg/an de poissons pêchés en aval des rejets du site) 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 $10\ \mu\text{Sv}/\text{an}$ (la plus élevée estimée dans ce bilan), mais qui est 300 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. 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 des activités réellement rejetées (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 représente toutefois 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 La Hague ou des CNPE, 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 l'essentiel des doses susceptibles d'être reçues par la population riveraine. Elle fournit d'autre part un élément de validation des calculs effectués par les exploitants. Cette connaissance n'est toutefois pas seulement issue de la surveillance réglementaire. Des études supplémentaires réalisées à l'initiative de l'IRSN ou de certains exploitants y contribuent également.

Le bilan montre que les doses estimées sur la période 2018-2020 sont, pour la plupart des sites, très proches de celles relatives au précédent bilan (2015-2017). Les rejets de ces sites sont assez constants depuis plusieurs années et engendrent des concentrations dans l'environnement également assez constantes. Les fluctuations des doses, qui peuvent atteindre un facteur 2, sont liées notamment à la représentativité spatio-temporelle des échantillons environnementaux analysés.

Dans le cas des sites de Marcoule, Bruyères-le-Châtel, Grenoble et Romans-sur-Isère, les résultats acquis sur la période 2018-2020 confirment ceux relatifs à la période précédente (2015-2017) qui témoignaient d'une baisse très importante des rejets par rapport à la période encore antérieure (2011-2014). Dans le cas du site de Malvézi, la dose due aux rejets d'uranium, estimée sur la base des mesures effectuées début 2021, est notablement plus faible que celle relative aux années 2011-2014 en raison de la baisse des rejets. On note toutefois que le débit de dose mesuré en bordure du site pourrait conduire à une dose externe supérieure à celles liées à l'incorporation d'uranium. Enfin, dans le cas de Creys-Malville, la baisse très importante des rejets (de l'ordre de 1 000 fois plus faibles en 2018 et 2019 par rapport aux années précédentes) fait que les activités de tritium dans l'environnement de ce site ne sont plus mesurables et qu'il n'a pas été possible d'estimer de dose pour le présent bilan.

Par ailleurs, certaines données qui n'avaient pas été exploitées en termes dosimétriques dans le bilan 2015-2017 l'ont été dans le présent bilan. Ainsi, il a été possible d'estimer une dose due au carbone-14 autour du site de Cadarache.

Comme pour le bilan radiologique précédent, les doses n'ont pas pu être estimées autour de certains sites dont l'influence des rejets sur l'environnement est trop faible pour être quantifiable par la mesure. Il s'agit des sites de la Marine nationale (Cherbourg, Toulon, Brest), de Fontenay-aux-Roses, de Brennilis, de Bruyères-le-Châtel et du CSA-Cires. Pour ces sites, les doses estimées par les exploitants par calcul sur la base des activités rejetées, toutes voies d'atteinte et radionucléides considérés, sont inférieures, voire très inférieures à 0,1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (à l'exception du site de Cadarache pour lequel la dose estimée par le CEA est principalement due à l'émanation additionnelle de radon).

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	Radionucléide et voie 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⁾	⁸⁵ Kr – exposition externe
	0,7	0,4 à 2,9	0,7 à 3,6	¹⁴ C – inhalation et ingestion de denrées
	1,1	0,25 – 2,7	0,3 à 2,6	¹²⁹ I – inhalation et ingestion de denrées
	–	0,02 à 0,2	0,05 à 0,2	⁹⁰ Sr – ingestion de lait
	0,62	0,02 à 0,14 ⁽³⁾	0,04 à 0,25 ⁽³⁾	⁶⁰ Co, plutonium et ²⁴¹ Am – ingestion de denrées marines
	–	< 0,03	0,01 à 0,02	³ H – inhalation et ingestion de denrées
Malvésii	2	–	0,8	Uranium – inhalation
	0,4	–	–	Uranium – ingestion de légumes
	–	0,002	0,003	Uranium – ingestion ponctuelle de 1 litre d'eau
	–	0,01	–	Uranium – ingestion ponctuelle de 1 kg de blé
	–	–	3,5 ⁽⁴⁾	Dose externe à proximité immédiate du site
Tricastin	0,05	0,06	0,03	Uranium – inhalation
	0,003	0,003	0,003	Uranium – ingestion ponctuelle de 1 litre d'eau
Romans/Isère	0,5	0,15	0,03	Uranium – inhalation
Marcoule	0,12	–	0,07	³ H – inhalation, transcutanée
	0,28	–	–	³ H – ingestion de denrées
	–	0,07	0,06	¹⁴ C – ingestion de denrées terrestres
Saclay	0,28	0,15	0,13	³ H – ingestion de denrées (eau notamment)
	1,4	1,4	1,2	¹⁴ C – ingestion de poissons d'étang
Grenoble (ILL)	0,14	0,05	0,04	³ H – inhalation, transcutanée
	–	0,03	0,03	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	³ H – inhalation/transcutanée
	–	0,10 à 0,15	0,06 à 0,18	³ H – ingestion de denrées solides
	–	0,7	0,64	³ H – ingestion d'eau
Cadarache	–	–	0,05	¹⁴ C – inhalation et ingestion de denrées

(1) Sur la base des activités de ⁸⁵Kr mesurées.

(2) Sur la base des mesures de débit de dose.

(3) Mollusques uniquement.

(4) Pour une exposition d'une dizaine d'heures.

Sites	BR 2011-2014	BR 2015-2017	BR 2018-2020	Radionucléide et voie d'atteinte
	Dose (µSv/an)			
Sites des CNPE	0,1	0,05 à 0,075	0,07 à 0,09	¹⁴ C – inhalation et ingestion de denrées terrestres
	0,12	0,007 à 0,4	0,002 à 0,5	¹⁴ C – ingestion de poissons fluviaux
	0,01 à 0,7	0,04 à 0,5	0,04 à 0,5	³ H – ingestion d'eau
	–	0,007 ⁽⁵⁾	0,0085 ⁽⁶⁾	³ H – inhalation, transcutanée
	–	0,003	0,002	³ H – ingestion de denrées terrestres
	–	< 0,001	< 0,001	³ H – ingestion de poissons fluviaux
	0,08	< 0,02	< 0,01 à 0,05	^{110m} Ag – ingestion de poissons de mer
	0,0004	< 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
Radioactivité naturelle		320		Exposition au rayonnement cosmique
		590		Voyageur aérien fréquent
		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)

(5) Site de Cruas.

(6) Site de Saint-Albans.

Site de stockage des résidus de Mange Garri



© M. Colin



04

INSTALLATIONS CLASSÉES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (ICPE)

4.1. INTRODUCTION	298
4.2. LE SITE DE MANGE GARRI	299
4.3. LES SITES DE STOCKAGES DE PHOSPHOGYPSES	302
Production et stockage	302
Prélèvements et analyses en laboratoire	303
Mesures <i>in situ</i>	304
4.4. LA SOMANU	306
Les rejets radioactifs	306
Surveillance radiologique de l'environnement du site	308
Influence sur le milieu terrestre	309
Influence sur le milieu aquatique	310

04

INSTALLATIONS CLASSÉES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (ICPE)

4.1. 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 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 qui sont présentés dans le chapitre 5 sont aussi 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 dépendent pas 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 étant également centralisés dans le RNM, un chapitre du bilan radiologique leur est désormais consacré, en complément de celui consacré aux anciens sites miniers. Compte tenu du fait que leur influence potentielle sur l'environnement est beaucoup 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 d'en sélectionner trois d'entre elles à titre d'illustration de leur variété et des préoccupations environnementales qu'elles induisent. À noter qu'un choix similaire a été fait pour les anciens sites miniers pour lesquels deux nouveaux sites sont traités dans le chapitre 5 après les quatre sites choisis pour le bilan précédent (2015-2018).

Deux des ICPE ou types d'ICPE sélectionnées pour le présent bilan induisent des préoccupations radiologiques du fait qu'elles produisent et stockent des déchets dans lesquels la radioactivité naturelle a été « renforcée » (RNR) en raison des processus industriels mis en œuvre qui, en modifiant les équilibres physico-chimiques, entraînent une concentration des radionucléides naturels contenus dans les matières utilisées. La troisième ICPE choisie, Somanu, est une ancienne installations nucléaire de base (INB jusqu'en 2018), spécialisée dans l'inspection, l'entretien, la réparation et l'entreposage temporaire de matériels contaminés, en lien notamment avec les composants des circuits primaires des réacteurs nucléaires.

(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.

4.2. LE SITE DE MANGE GARRI

L'usine Alteo de Gardanne (13) produit des alumines à hautes valeurs ajoutées pour l'industrie, par extraction sélective à l'aide de soude (procédé Bayer) de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) à partir de bauxite. La bauxite est une roche latéritique ayant subi une altération due au lessivage par les pluies. Ce lessivage entraîne une concentration élevée en oxydes de fer (10 à 20 % en masse) donnant sa couleur rouge à la bauxite et surtout en oxydes d'aluminium (jusqu'à 60 %) ainsi qu'en silice et silicates (jusqu'à 8 %) dont des zircons contenant de l'uranium (^{238}U) et du thorium (^{232}Th) à l'état d'impuretés⁽³⁾. La bauxite de Guinée traitée à Gardanne présente des activités massiques en ^{238}U et ^{232}Th respectivement de l'ordre de 100 et 200 Bq/kg, soit 3 à 5 fois supérieures aux niveaux moyens mesurés dans des sols en France mais du même niveau de ce que l'on trouve dans les sols des régions granitiques (Massif armoricain, Massif central, Vosges, une partie de la Corse, des Alpes et des Pyrénées).

L'extraction de l'alumine génère un enrichissement supplémentaire (environ x 2) en uranium et en thorium dans le résidu solide (« boues rouges ») issu du traitement. Ces boues déshydratées sont stockées à l'air libre sur le site de Mange Garri (commune de Bouc-Bel-Air). Le stockage est réalisé sur une zone de 23,5 ha constituant une Installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE). Par vent fort et selon le degré d'humidité des résidus, des poussières de boues rouges peuvent être mises en suspension et transportées en dehors du site de stockage.



Usine Alteo de fabrication d'alumine à Gardanne

© Alteo



Vue aérienne du site de Mange Garri

© Geoportail-IGN

(3) L'oxyde d'aluminium, l'oxyde de fer, la silice et les silicates sont non radioactifs.

Afin d'apporter des éléments de réponses objectifs aux inquiétudes exprimées par les riverains du site de Mange Garri, l'IRSN s'est intéressé pendant un an (entre 2019 et 2020) aux niveaux d'activité en uranium et en thorium dans l'air au voisinage de ces stockages ainsi qu'au marquage éventuel de la végétation environnante (feuilles d'arbres) et des denrées produites localement (épis de blé et salades) (figure 1).

Les niveaux d'activités de l'uranium et du thorium ont été comparés à ceux trouvés sur des sites proches et considérés comme non influencés compte tenu de la rose des vents et dans lesquels ces deux radioéléments sont naturellement présents. De plus, le rapport $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ des échantillons permet de suivre l'influence de la bauxite et des boues rouges car ces matériaux se caractérisent par un excès de Th et donc un rapport U/Th faible (de l'ordre de 0,45), comparé à celui des sols (de l'ordre de 1).

Les prélèvements atmosphériques réalisés en 2019 sur la commune de Gardanne (à environ 2 km du site de stockage de Mange Garri sur la commune de Bouc-Bel-Air), présentent des niveaux en ^{238}U et en ^{232}Th en moyenne 3 à 4 fois plus élevés que sur le site témoin (figure 2). Ce site témoin a été choisi en dehors du département des Bouches-du-Rhône

et est par conséquent hors influence du site. Les prélèvements atmosphériques réalisés en 2020 à Bouc-Bel-Air indiquent des niveaux dans l'air ^{238}U et en ^{232}Th ($0,33 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ et $0,27 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) inférieurs à ceux de Gardanne en 2019, malgré la plus grande proximité ($\approx 500 \text{ m}$) avec le site. Ceci résulte du fait que Bouc-Bel-Air, contrairement à Gardanne, ne se trouve pas sous les vents dominants qui viennent du nord-est (voir la rose de vents). La valeur du rapport U/Th dans les échantillons présentant les niveaux les plus élevés en ^{238}U tend vers celle caractéristique de la bauxite et des boues rouges (0,45), ce qui suggère une influence du site de stockage.

Aucun excès de radionucléides naturels (^{238}U , ^{232}Th et descendants) n'a été trouvé dans les épis de blé et les légumes feuilles produits localement dans les parcelles potentiellement sous influence des émissions de poussières depuis les stockages de résidus, en comparaison des valeurs mesurées ailleurs en France. En revanche, un marquage par les poussières du site de stockage a été décelé dans les feuilles de chênes prélevées à proximité. Ce marquage se traduit par des concentrations en ^{232}Th et en ^{238}U , 9 et 4 fois supérieures respectivement, par rapport au prélèvement en zone de référence.

FIGURE 1 / LOCALISATION DES PRÉLÈVEMENTS ET ROSE DES VENTS

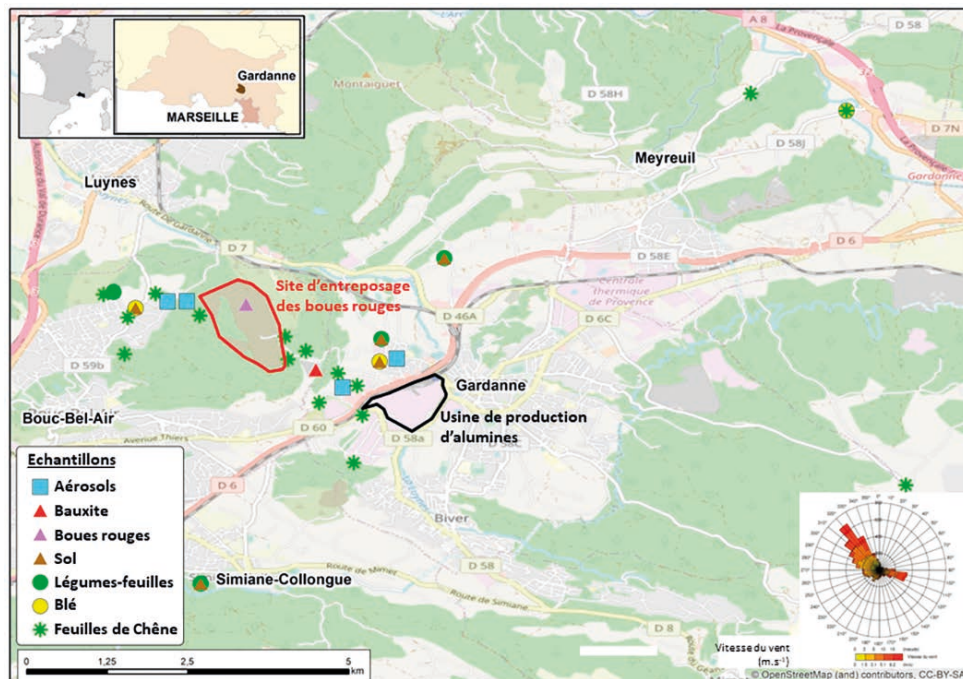
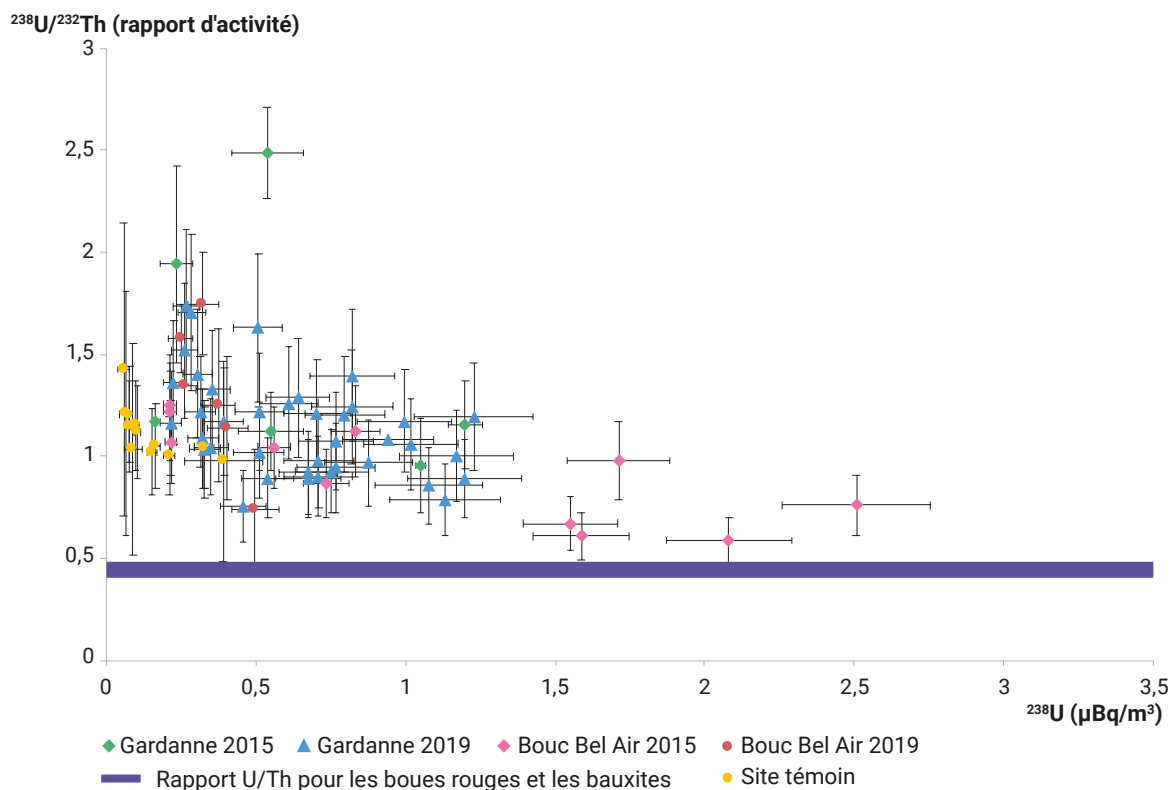


FIGURE 2 / ACTIVITÉ VOLUMIQUE EN ^{238}U (en $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) ET RAPPORT $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ DANS LES AÉROSOLS PRÉLEVÉS EN 2015, PUIS ENTRE 2019 ET 2020 À GARDANNE (GARD) ET BOUC-BEL-AIR (BBA) (le trait violet représente le rapport U/Th de la bauxite et des boues rouges)



La différence entre le marquage des feuilles de chênes et l'absence de marquage des légumes feuilles résulte vraisemblablement de la durée d'exposition des végétaux : exposition de plusieurs mois pour le feuillage caduc des chênes et exposition de quelques semaines seulement, correspondant à la durée de croissance des céréales et légumes feuilles.

Pour en savoir plus

<https://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/Publications/Publications-environnementales/Installations-Classes-pour-la-Protection-de-l-Environnement-ICPE/Installations-Classes-soumises-a-autorisation-et-a-enregistrement-et-carrieres/Bouc-Bel-Air>



Station de collecte d'aérosols à grand débit ($300 \text{ m}^3/\text{h}$) installée temporairement par l'IRSN dans l'environnement du site de Mange-Garri pour sa campagne de mesures.

4.3. LES SITES DE STOCKAGES DE PHOSPHOGYPSES

Production et stockage

Lors de la production d'engrais phosphatés ou d'acide phosphorique, l'attaque du minerai de phosphate de calcium par de l'acide sulfurique forme un sous-produit, le phosphogypse, qui contient une grande partie du radium-226 (environ 80 %), du thorium-232 (environ 30 %) et de l'uranium-238 (environ 14 %) présents naturellement dans la roche calcaire. On estime que pour produire une tonne d'acide phosphorique, le procédé génère environ 5 tonnes de phosphogypse.

Dans les années 1980, la production annuelle française était d'environ 7 millions de tonnes de phosphogypses, très concentrée géographiquement, notamment sur les sites de production normands (Rouen – Le Havre, 63 % de la production nationale) et de Wattrelos dans le Nord (9 %). Le reste de la production était assuré par différents sites répartis sur l'ensemble du territoire (figures 3 et 4).

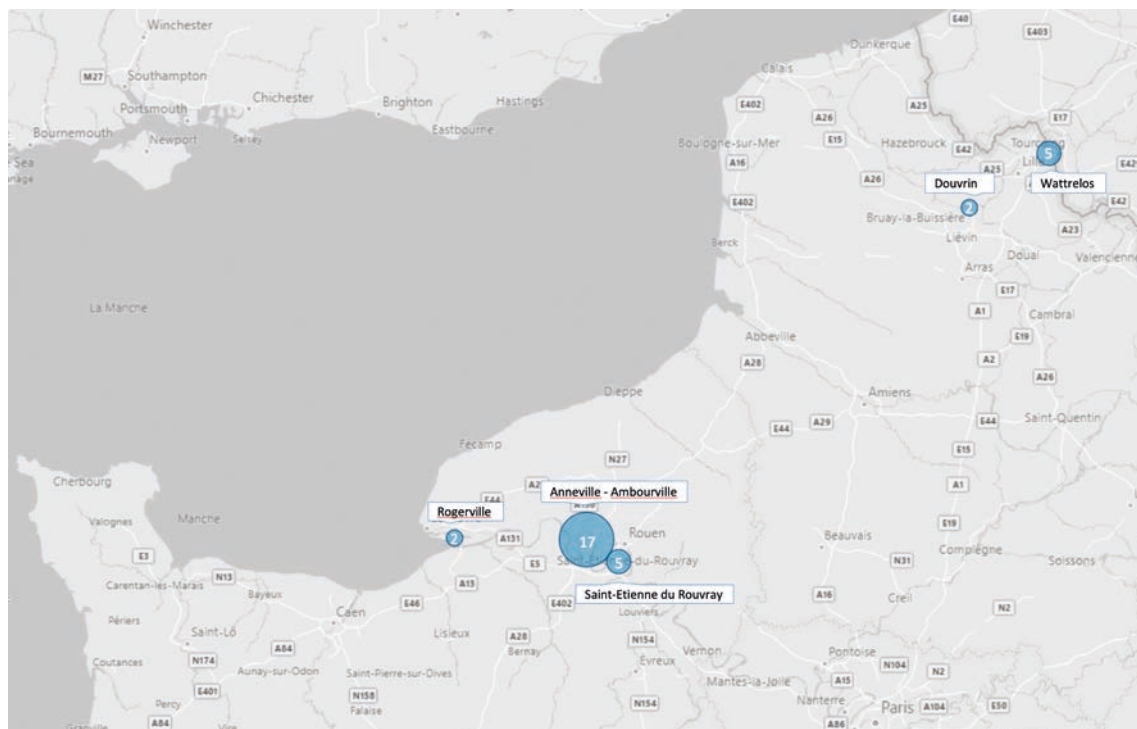
Jusqu'aux années 1990, les usines françaises rejetaient en mer les phosphogypses ou les stockaient en terrils. Les principaux sites de stockage sont ainsi localisés à proximité des principaux lieux de production : Anneville-Ambourville (60 ha), Wattrelos (50 ha), Saint-Étienne-du-Rouvray (30 ha), Rogerville (17 ha) et Douvrin (20 ha). Certains sites de production comme Wattrelos et Rouen (site du Petit Quevilly) ont depuis fait l'objet d'une réhabilitation. Les autres sites continuent de faire l'objet d'une surveillance régulière prescrite par les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), portant notamment sur le contrôle des eaux souterraines.

L'Andra recense, dans son inventaire national des matières et déchets radioactifs, des déchets de très faible activité (TFA) sur les anciens sites d'Ottmarsheim, de Rogerville et de Grand-Quevilly, et de faible activité à vie longue (FA-VL) sur les deux premiers.

FIGURE 3 / IMPLANTATIONS DES PLATEFORMES INDUSTRIELLES QUI GÉNÉRAIENT DES PHOSPHOGYPSES



FIGURE 4 / IMPLANTATIONS DES PLATEFORMES INDUSTRIELLES QUI GÉNÉRAIENT DES PHOSPHOGYPSES



Prélèvements et analyses en laboratoire

Afin d'étudier l'impact radiologique sur l'environnement de ces stockages de déchets RNR, l'IRSN a réalisé en 2015, dans le cadre du *Constat radiologique Normandie et Hauts-de-France*, une campagne de prélèvements d'eau en aval du site de Watrelos, ainsi que dans la Seine en aval des sites d'Anneville-Ambourville et de Saint-Étienne du Rouvray. L'IRSN a également réalisé des mesures de caractérisation *in situ* à proximité de ce dernier.

Lors de la campagne d'octobre 2015 en aval du site de Watrelos, les prélèvements ont été réalisés dans les canaux de Roubaix et de l'Espierre, celui-ci récoltant les eaux pluviales qui ruissellent sur le flanc du terail. Dans le prélèvement d'eau réalisé dans le canal de Roubaix, les indices d'activités alpha et bêta globaux (tableau 2)

sont inférieurs aux valeurs de référence des eaux destinées à la consommation humaine⁽⁴⁾. *A contrario*, dans le prélèvement réalisé dans le canal de l'Espierre, ces mêmes indices sont supérieurs aux valeurs de référence. Les isotopes 234 et 238 de l'uranium mesurés par ICP-MS sont à l'équilibre (rapports ²³⁴U/²³⁸U respectivement de 0,008 % et 0,007 %) et les activités sont faibles (bien que supérieures d'un facteur 3 environ dans le canal de l'Espierre par rapport au canal de Roubaix), de l'ordre de grandeur des activités usuellement mesurées dans les eaux de surface. Par ailleurs, aucune activité significative n'a été mesurée pour la chaîne du thorium-232.

Sur le canal de Roubaix, aucune activité significative n'a été relevée sur les descendants de l'uranium-235 et de l'uranium-238, hormis pour l'uranium-234, la méthode d'analyse par ICP-MS permettant d'atteindre des niveaux de détection très bas.

(4) Valeurs de référence de l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine. En cas de valeur supérieure à 0,1 Bq/L pour l'indice alpha global et 1 Bq/L pour l'indice bêta global, il est procédé à l'analyse de radionucléides spécifiques. Dans le cas de la radioactivité naturelle, il s'agit de l'uranium-234, de l'uranium-238, du radium-226, du radium-228, du polonium-210 et du plomb-210.

Sur le canal de l'Espierre en revanche, les activités significatives relevées pour le thorium-230 (activité du même ordre que celle de l'uranium-238) et le bismuth-214 peuvent expliquer les niveaux des indices alpha et bêta globaux. L'activité en bismuth-214 nettement supérieure à celle du thorium-230 illustre le phénomène de rupture de chaîne (tableau 1).

Lors de la campagne effectuée en aval en aval des sites de stockage d'Anneville – Ambourville et de Saint-Étienne-du-Rouvray, les prélèvements ont été effectués sur la Seine à Yville-sur-Seine. Il n'a été mis en évidence aucune activité radiologique d'origine naturelle supérieure aux valeurs habituellement mesurées pour ce prélèvement.

Mesures *in situ*

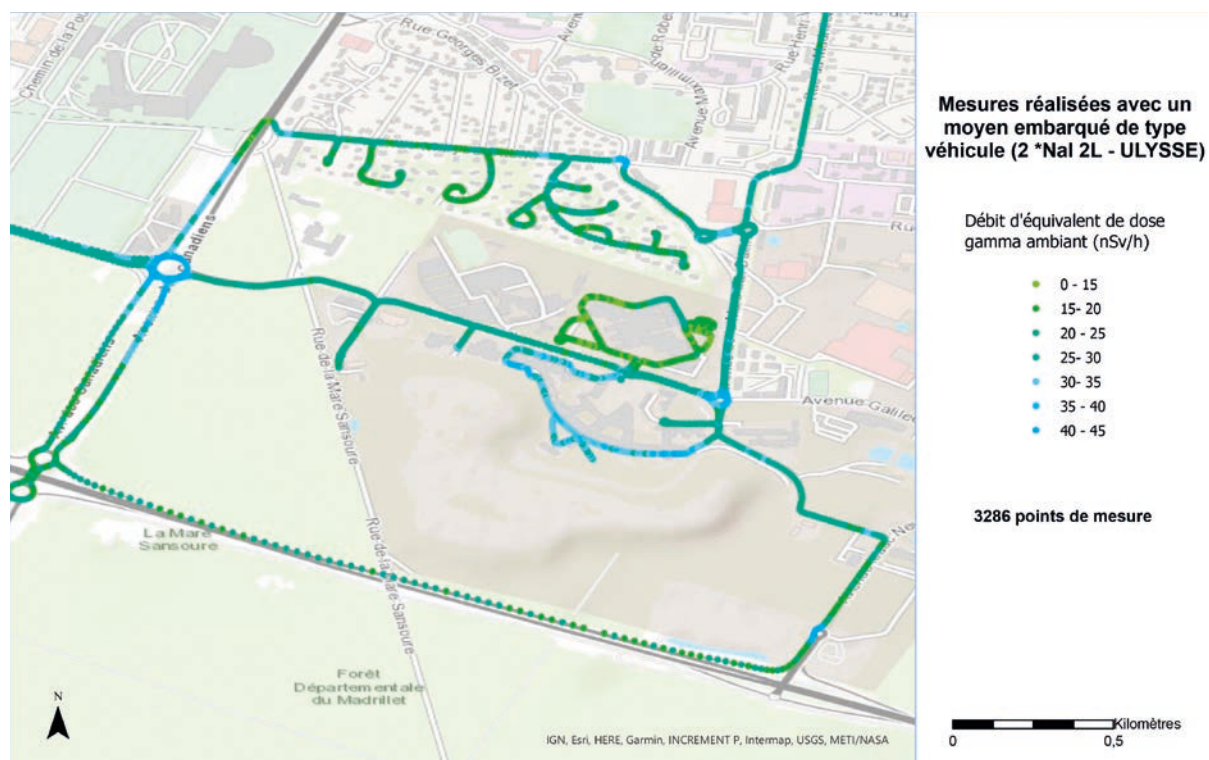
En complément des prélèvements réalisés en aval du site de Saint-Étienne du Rouvray, une mission de caractérisation *in situ* a également été menée par l'IRSN le 14/12/2017 autour du site. Des mesures du débit d'équivalent de dose gamma ambiant ont été réalisées avec un système de détection embarqué au sein d'un véhicule (cartographie d'axes routiers, figure 5). Les résultats, tous compris entre 7 et 45 nSv/h, sont faibles et correspondent à la fluctuation usuellement observée du rayonnement naturel en milieu urbain. Aucune anomalie radiologique n'a été mise en évidence lors de cette cartographie.

À l'issue de ces campagnes, il a donc pu être observé une légère augmentation de la radioactivité naturelle dans un prélèvement d'eau réalisé en aval du site de Watrelos. De futures campagnes de prélèvements sur les autres sites permettront de compléter les connaissances sur la radioactivité naturelle renforcée issue des stockages de phosphogypses.

TABLEAU 1 / RÉSULTATS DES ANALYSES EFFECTUÉES SUR LES PRÉLÈVEMENTS RÉALISÉS EN AVAL DU SITE DE WATRELOS

Chaîne	Radionucléide	Activité (Bq/L)	
		Canal de Roubaix	Canal de l'Espierre
-	Indice α global	0,016 \pm 0,009	0,168 \pm 0,050
-	Indice β global	0,49 \pm 0,16	1,09 \pm 0,36
	^3H	< 2,2	< 2,4
-	^{40}K	< 0,77	< 0,78
Chaîne de l'uranium-238	^{238}U	0,0039 \pm 0,0016	0,009 \pm 0,002
	^{234}Th	< 0,78	< 0,79
	$^{234\text{m}}\text{Pa}$	< 5	< 5
	^{234}U	0,005 \pm 0,002	0,015 \pm 0,004
	^{230}Th	< 0,001	0,009 \pm 0,003
	^{226}Ra	< 0,06	< 0,01
	^{214}Pb	< 0,1	< 0,1
	^{214}Bi	< 0,09	0,13 \pm 0,06
	^{210}Pb	< 3,4	< 3,5
Chaîne du thorium-232	^{232}Th	< 0,001	< 0,001
	^{228}Ac	< 0,16	< 0,17
	^{228}Th	< 0,002	< 0,002
	^{212}Pb	< 0,08	< 0,08
	^{212}Bi	< 0,56	< 0,55
	^{208}Tl	< 0,05	< 0,05
Chaîne de l'uranium-235	^{235}U	0,00018 \pm 0,00007	0,00043 \pm 0,00009
	^{223}Ra	< 0,22	< 0,22

FIGURE 5 / DÉBITS D'ÉQUIVALENT DE DOSE GAMMA AMBIANT MESURÉS SUR DES AXES ROUTIERS AUTOUR DU SITE DE SAINT-ÉTIENNE DU ROUVRAY EN 2017 (nSv/h)



Prélèvement de sédiments dans l'Espierre en aval de Wattlelos

© IRSN

4.4. LA SOMANU

La Société de maintenance nucléaire (Somanu), localisée à Maubeuge dans le Nord, a été créée en 1985. Elle est spécialisée dans l'inspection, l'entretien, la réparation et l'entreposage temporaire de matériels contaminés, en lien notamment avec les composants des circuits primaires des réacteurs nucléaires. De ce fait, ses activités industrielles sont susceptibles de générer des effluents radioactifs, en particulier liquides. Le site était soumis de 1986 à 2018 au régime des installations nucléaires de base (INB 143), et est aujourd'hui une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE).

Les rejets radioactifs

Les effluents radioactifs liquides issus des eaux de lavage (linge et sols) et des points d'eaux de l'atelier sont filtrés et collectés dans des cuves qui font l'objet d'un contrôle avant rejet. Le rejet s'opère vers un collecteur d'eaux usées, qui rejoint ensuite le réseau général d'assainissement de la zone industrielle, dont l'exutoire final est la Flamenne. Les eaux pluviales et eaux de drainage du terrain sont également surveillées par un contrôle mensuel.

Le spectre de rejet de l'installation est constitué de produits de fission et d'activation des constituants du circuit primaire ayant fait l'objet d'un traitement en maintenance. Il s'agit essentiellement d'émetteurs gamma, tels que le manganèse-54 ou les cobalt-58 et cobalt-60, mais également du tritium (figures 6 et 7).

Depuis mi-2018, les activités rejetées de certains radionucléides semblent avoir diminué. C'est notamment le cas des cobalts (^{58}Co et ^{60}Co) et du manganèse-54 dont les activités sont devenues presque systématiquement inférieures à 10 Bq/L, alors que celles d'autres radionucléides sont restées stables depuis 2017, de l'ordre ou inférieures à 1 Bq/L.

Les rejets en tritium restent également faibles, avec des activités avant rejet dans la plupart des cas inférieures à 10 Bq/L.

Si les rejets s'opèrent avant tout par voie liquide, les rejets gazeux de l'atelier font également l'objet d'une surveillance par mesure des filtres au niveau de la cheminée de l'atelier, pour détermination des activités α et β globales. Sur les trois dernières années, les activités mesurées étaient systématiquement inférieures à 0,5 mBq/m³ pour l'indice α global et 2 mBq/m³ pour l'indice β global.



Station de prélèvement AS1 du site de la Somanu

© IRSN

FIGURE 6 / ACTIVITÉS MESURÉES DES ÉMETTEURS GAMMA AU NIVEAU DES CUVES ATELIER AVANT REJET (Bq/L)

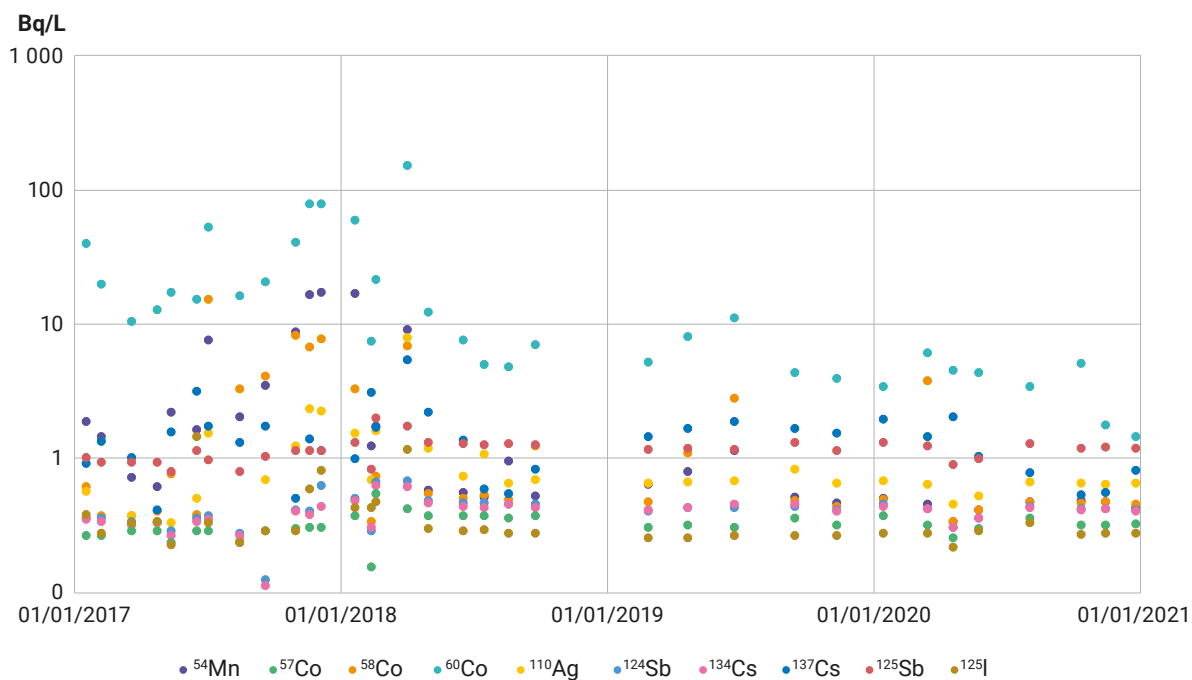
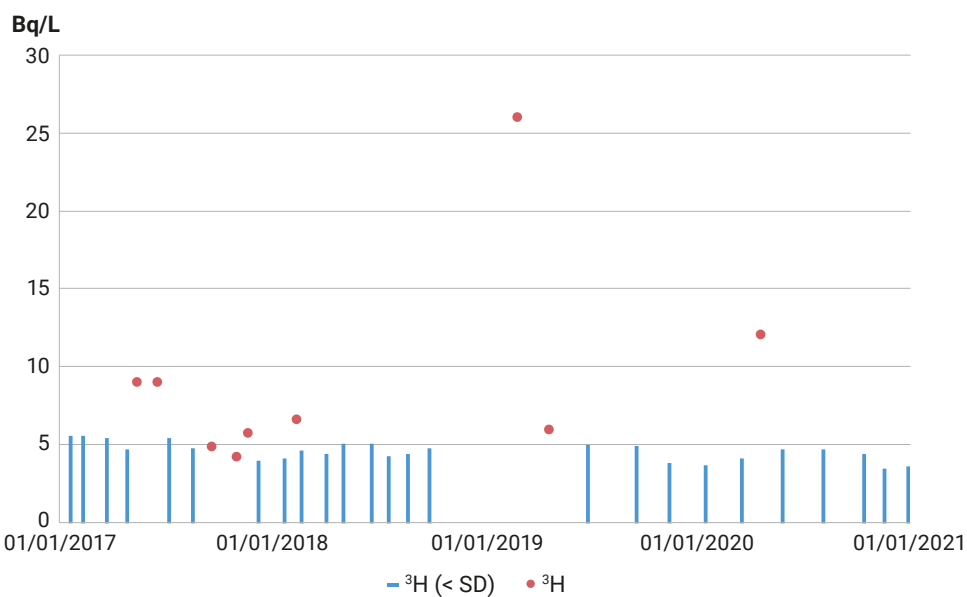


FIGURE 7 / ACTIVITÉS MESURÉES EN TRITIUM AU NIVEAU DES CUVES ATELIER AVANT REJET (Bq/L)



Surveillance radiologique de l'environnement du site

L'arrêté du 7 août 1986 relatif à l'autorisation de rejet d'effluents radioactifs liquides par l'atelier de maintenance nucléaire de la Société de maintenance nucléaire à Maubeuge (Nord) prévoit la mise en place par l'exploitant d'un programme de surveillance de l'environnement sur :

- le compartiment aquatique, en vue de déterminer les niveaux d'activité dans la Flammenne en lien avec les rejets liquides de l'installation ;

- les compartiments atmosphérique et terrestre, en lien avec les éventuels rejets gazeux, avec la mesure du débit de dose gamma ambiant et des prélèvements en continu d'aérosol et mensuels d'herbe ;
- 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 sur l'eau de la Flammenne et le milieu atmosphérique. Le tableau 2 résume les plans de surveillance réglementaire de l'installation et de l'IRSN.

TABLEAU 2 / LES PLANS DE SURVEILLANCE RÉGLEMENTAIRE DE L'EXPLOITANT ET DE L'IRSN

Chaîne	Surveillance de l'exploitant	Surveillance IRSN
Débit d'équivalent de dose gamma ambiant	• 4 points avec dosimètre passif	• 1 point avec mesure en continu (réseau Téléray)
Aérosols	• 1 point Prélèvement quotidien Mesure de l'indice α/β global	• 1 point Prélèvement hebdomadaire Mesure des émetteurs gamma
Eau de pluie	• 1 point (réseau eaux pluviales) Prélèvement mensuel Mesure des indices α et β globaux	• 1 point (collecteur eau de pluie) Prélèvement mensuel Mesure des émetteurs gamma
Végétaux (herbe)	• 3 points* Prélèvement mensuel Mesure des émetteurs gamma	-
Eau de la Flammenne	• 1 point Prélèvement à chaque mi-rejet, mensuel en l'absence de rejet Mesure des indices α et β globaux et du tritium	• 1 point Prélèvement semestriel Mesure du tritium et des émetteurs gamma
Sédiment de la Flammenne	-	• 1 point Prélèvement semestriel Mesure des émetteurs gamma
Végétaux aquatiques dans la Flammenne	-	• 1 point Prélèvement semestriel Mesure du TOL et des émetteurs gamma
Eaux usées	• 1 point (réseau eaux usées) Prélèvement mensuel Mesure des indices α et β globaux et du tritium	-
Eau de nappe	• 4 points Prélèvement mensuel Mesure des indices α et β globaux et du tritium	-

* L'exploitant a ajouté un point de prélèvement supplémentaire en 2018 aux deux points requis par l'arrêté de 1986.

Influence sur le milieu terrestre

Les analyses réalisées par l'exploitant et par l'IRSN confirment l'absence de rejet par voie atmosphérique : sur la période 2018-2020, les activités α et β globales mesurées sur les prélèvements d'aérosols de l'exploitant sont toutes respectivement inférieures à 1 mBq/m³ et 3 mBq/m³, et aucune mesure en spectrométrie gamma des filtres de l'IRSN ne fait apparaître d'activité significative pour les radionucléides artificiels.

De même, aucune activité significative en tritium ou autre radionucléide artificiel n'a été mesurée par l'exploitant ou l'IRSN depuis 2017 sur les eaux de pluie. Les activités α et β globales sont quant à elles toujours inférieures aux valeurs de référence des eaux destinées à la consommation humaine⁽⁵⁾.

Les activités mesurées dans les prélèvements d'herbe effectués à l'extérieur du site sont inférieures au seuil de décision, à l'exception de celles de césium-137 qui se situent dans la gamme du bruit de fond de ce radionucléide hérité des retombées anciennes (cf. chapitre 2).

En 2017, l'IRSN avait également procédé dans un rayon de 500 m et sous les vents dominants à des prélèvements de sol et d'herbe au sud-ouest et d'herbe au nord-est du site qui ont confirmé ces résultats. Le seul radionucléide artificiel mesuré est le ¹³⁷Cs, dans le prélèvement de sol, avec une activité de 2,78 ± 0,40 Bq/kg sec, cohérente avec les valeurs observées usuellement sur le reste du territoire. Dans les herbes, les valeurs en tritium organiquement lié et en tritium libre sont faibles et cohérentes, et ne mettent pas en évidence l'influence du site (tableau 3).

TABLEAU 3 / ACTIVITÉS MASSIQUES ET VOLUMIQUES DE TRITIUM LIBRE ET DE TRITIUM LIÉ DANS LES ÉCHANTILLONS D'HERBE PRÉLEVÉS À PROXIMITÉ DU SITE DE SOMANU

Point de prélèvement	Tritium libre	Tritium organiquement lié	
	Bq/L	Bq/L d'eau de combustion	Bq/kg sec
Nord-Est	0,88 ± 0,70	1,69 ± 0,60	0,90 ± 0,32
Sud-Ouest	1,13 ± 0,71	1,21 ± 0,58	0,65 ± 0,32



La Flamenne près de la Somanu

(5) Valeurs de référence de qualité pour les activités alpha et bêta globales : respectivement de 0,1 et 1 Bq/L issues de l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine.

Influence sur le milieu aquatique

Sur le volet aquatique, les indices α global et β global résiduels (après filtration et soustraction de la contribution du potassium-40) sont toujours inférieurs aux valeurs de référence des eaux destinées à la consommation humaine, tant pour les eaux usées⁽⁶⁾ que pour les prélèvements réalisés au niveau du point de rejet dans la Flamenne. Concernant le tritium, une seule mesure dans la Flamenne est supérieure au seuil de décision, avec une activité de $4,0 \pm 3,3$ Bq/L, relativement proche du bruit de fond compte tenu de son incertitude.

Depuis 2017⁽⁷⁾, l'IRSN procède également à des prélèvements d'eau, de sédiments et de végétaux aquatiques au niveau de l'exutoire de rejet dans la Flamenne, au même point que lors de la campagne de 2015 dans le cadre du *Constat Normandie et Hauts-de-France*. Les activités des radionucléides artificiels mesurées dans les sédiments, significatives uniquement pour le cobalt-60 et le césium-137, sont relativement constantes au cours du temps (figure 8). On peut noter que les valeurs en césium-137 correspondent à la fourchette basse des valeurs observées en France dans les sédiments de cours d'eau, et ne permettent pas de distinguer l'influence de l'installation.

Un plus grand nombre de radionucléides correspondant au spectre de rejet de l'installation peut être détecté dans les végétaux⁽⁸⁾ aquatiques, avec des valeurs plus élevées que dans les sédiments (figure 9). Si les activités de césium-137, inférieures à 2 Bq/kg sec, sont compatibles avec les valeurs observées en France hors influence des installations nucléaires, la détection des autres radionucléides (⁵⁴Mn, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co et ^{110m}Ag) et les niveaux plus élevés en ⁶⁰Co sont le reflet de l'influence sur le milieu aquatique des activités industrielles de la Somanu.

Les activités en tritium de l'eau prélevée dans la nappe phréatique au niveau des quatre piézomètres du site ne sont quasiment jamais significatives, à l'exception d'une valeur de $5,4 \pm 4,1$ Bq/L en novembre 2020, proche du seuil de décision.

En outre, les indices α global et β global résiduels sont toujours inférieurs aux valeurs de référence des eaux destinées à la consommation humaine.

(6) Une valeur significative en tritium a été mesurée en décembre 2018, avec cependant une très forte incertitude ($5,8 \pm 5,6$ Bq/L).

(7) Les prélèvements en 2020 n'ont pu être réalisés du fait des limitations liées au Covid-19.

(8) Prélèvements d'algues filamenteuses, sauf en 2018 (phanérogames aquatiques).

FIGURE 8 / ACTIVITÉ EN COBALT-60 ET CÉSIIUM-137 DES SÉDIMENTS PRÉLEVÉS DANS LA FLAMENNE EN AVAL DU POINT DE REJET (Bq/kg sec)

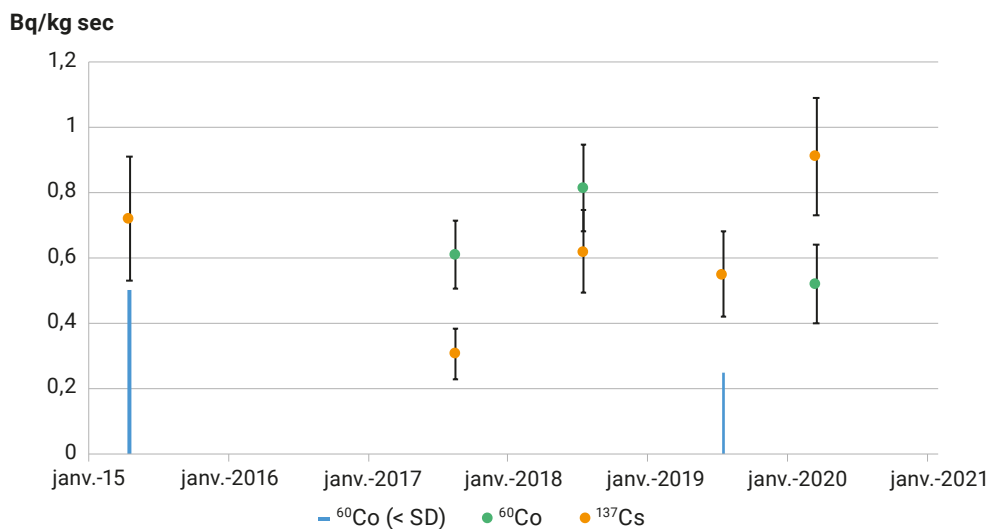
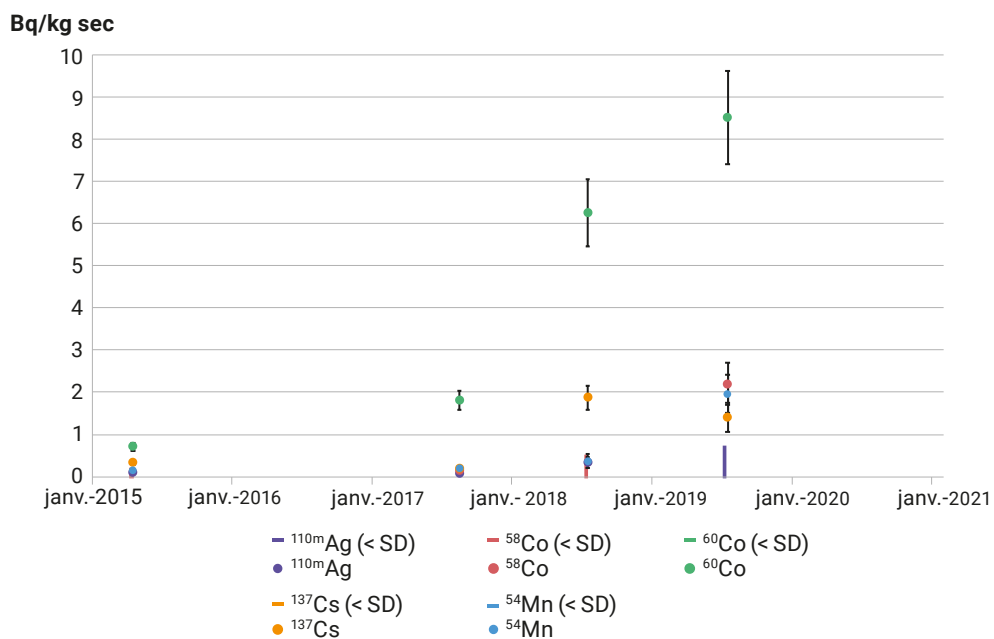


FIGURE 9 / ACTIVITÉS DES ÉMETTEURS GAMMA ARTIFICIELS DANS LES VÉGÉTAUX AQUATIQUES PRÉLEVÉS AU POINT DE REJET DANS LA FLAMENNE (Bq/kg sec)



Paysage de l'ancienne mine d'uranium à ciel ouvert du Villeret en Lozère, aujourd'hui ennoyée.



© IRSN



05

LES ANCIENS SITES MINIERES

5.1. INTRODUCTION	314
Généralités sur les sites miniers	315
5.2. INFLUENCE POTENTIELLE DES ANCIENS SITES MINIERES SUR LEUR ENVIRONNEMENT ET EXPOSITIONS DU PUBLIC ..	318
5.3. LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT AUTOUR DES ANCIENS SITES MINIERES	318
Aspects réglementaires.....	318
Description générale des dispositifs de surveillance.....	319
5.4. PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DU SITE INDUSTRIEL DE BESSINES	319
Présentation générale du Site Industriel de Bessines.....	321
Plan de surveillance.....	323
Rayonnement gamma et qualité de l'air.....	326
Les eaux de surface.....	328
Les sédiments.....	332
La chaîne alimentaire	332

05

LES ANCIENS SITES MINIERS

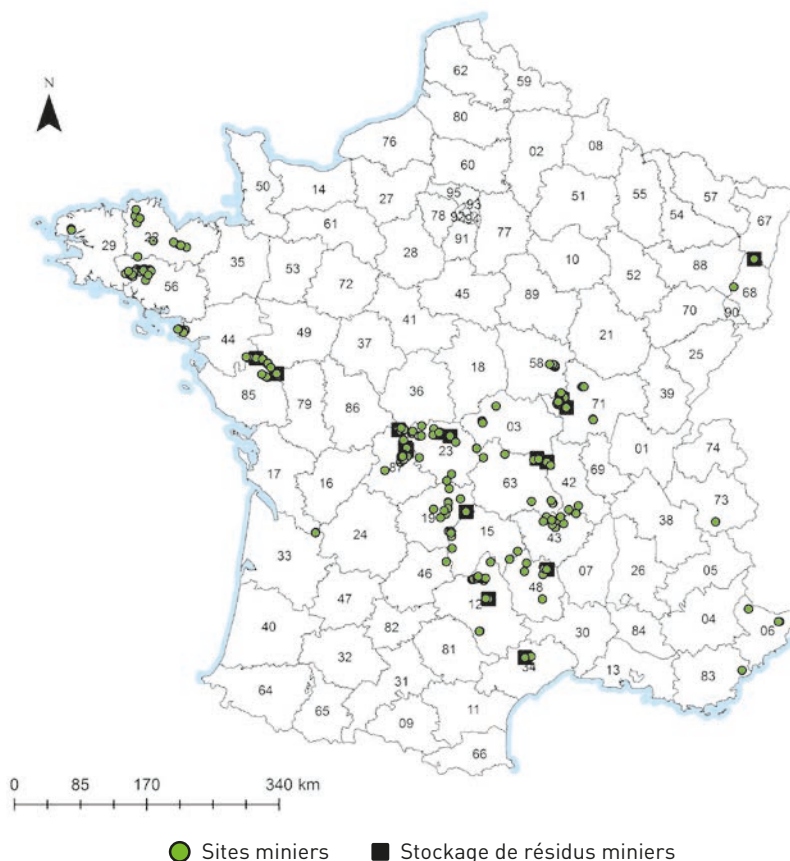
5.1. INTRODUCTION

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 1). 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 2). Les anciens sites miniers présentent donc aujourd'hui des caractéristiques et des enjeux très

FIGURE 1 / LOCALISATION DES ANCIENNES MINES D'URANIUM ET DES STOCKAGES DE RÉSIDUS DE TRAITEMENT DU MINERAI D'URANIUM EN FRANCE

D'après données MIMAUSA.



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. Après les sites de l'Écarpière, de la Commanderie, du Bosc et de La Porte qui ont été présentés dans le précédent *Bilan radiologique (2015-2017)* afin d'illustrer cette influence, c'est

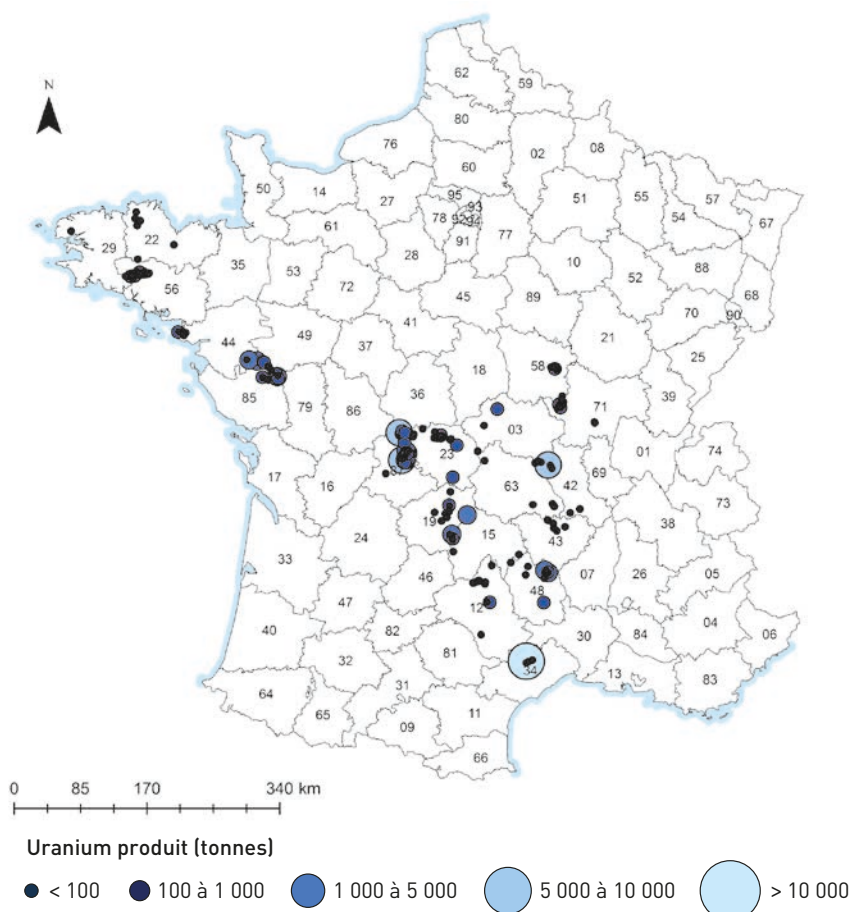
le site industriel de Bessines (SIB) qui a été choisi pour le présent bilan.

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.

FIGURE 2 / RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DE LA PRODUCTION FRANÇAISE D'URANIUM

D'après données MIMAUSA.



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).

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 1). 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 versos 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 barrés par des digues. Ces digues sont constituées de stériles, résidus de traitement statique et/ou sables cyclonnés issus du traitement dynamique.

TABLEAU 1 / 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 U-238 (Bq/kg)	Activité en Ra-226 (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.

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 2).

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 3). 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 3 / 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.

5.2. 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.

5.3. 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 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, généralement sur la base des prescriptions établies dans le règlement général des industries extractives (RGIE). 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⁽¹⁾.

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 potentielle (EAP) dues aux descendants à vie courte du radon-222 et du radon-220 (cf. chapitre 1, p. 12) 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 (cf. chapitre 1, pp. 9-10 et chapitre 2, pp. 50-52) ;
- la surveillance des eaux de surfaces : 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.

5.4. PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DU SITE INDUSTRIEL DE BESSINES

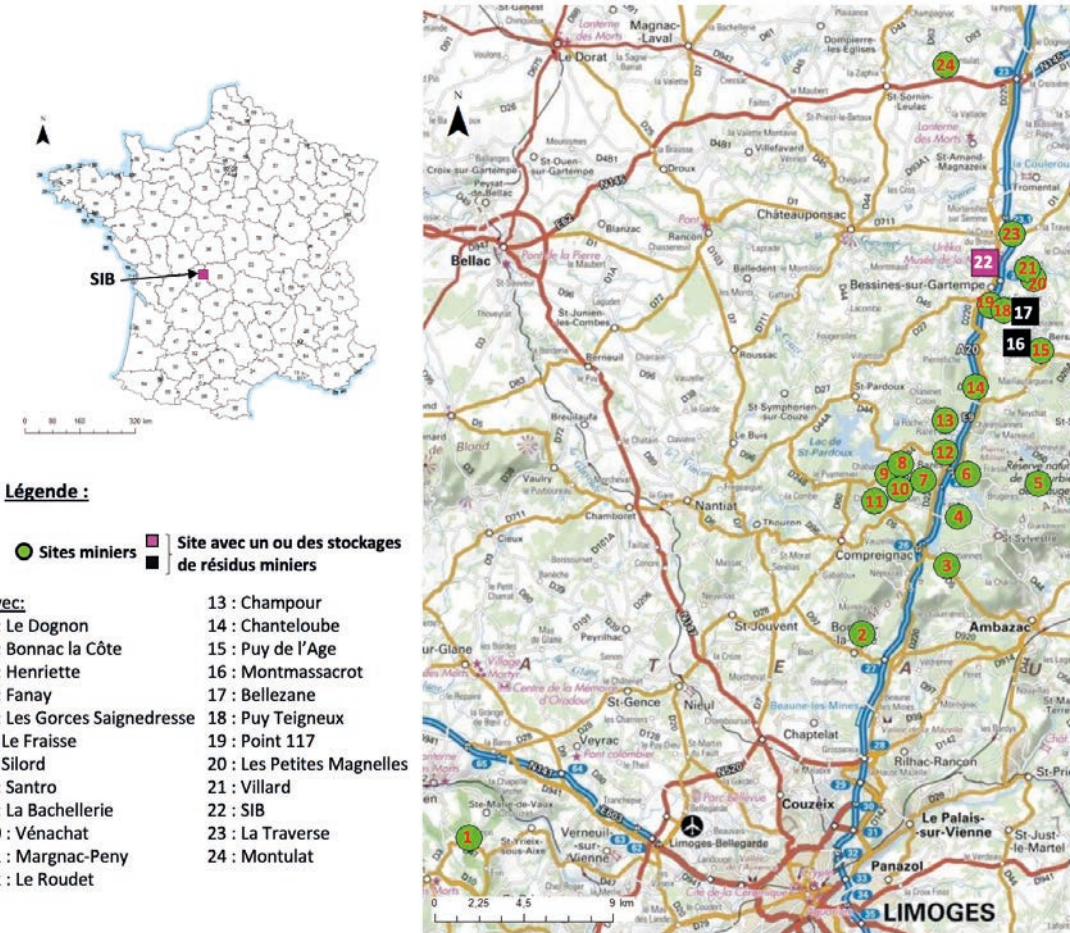
Compte tenu du grand nombre de sites sur le territoire métropolitain et de leur diversité (configuration, historique, état post-exploitation...), le Site Industriel de Bessines a été choisi pour être présenté dans ce *Bilan radiologique (2018-2020)*⁽¹⁾ parmi ceux :

- ayant une obligation de surveillance réglementaire afin de permettre de disposer de résultats de mesure sur plusieurs années, à l'instar des sites nucléaires présentés dans ce rapport ;
- dont l'environnement fait l'objet d'une surveillance réglementaire de la chaîne alimentaire ;
- comportant un stockage de résidus de traitement du minerai d'uranium (appelé résidus miniers par la suite).

Le Site Industriel de Bessines (SIB) (figure 4), l'un des plus importants du département de la Haute-Vienne, est particulièrement intéressant. En effet, il est l'un des 24 sites d'exploitation minière de la Division Minière de la Crouzille qui a produit de l'ordre de 35 % de la production française d'uranium. Le SIB a contribué à environ 8 % de production de cette Division. Entre 1958 et 1993, tout le minerai extrait dans cette Division a été acheminé vers l'usine de traitement installée sur le site du SIB (aujourd'hui démantelée) pour fabriquer le concentré marchand. Il possède une station de traitement des eaux en fonctionnement et comporte trois stockages : Lavaugrasse, la MCO du Brugeaud et la Verse du Brugeaud. Il convient de noter que 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.

(1) Pour le Bilan radiologique précédent (2015-2017), les sites présentés étaient les sites de l'Écarpière, de La Commanderie, du Bosc et de La Porte.

FIGURE 4 / LOCALISATION DU SITE INDUSTRIEL DE BESSINES (SIB) (à gauche)
 ET ANCIENS SITES MINIERS APPARTENANT À LA DIVISION MINIÈRE DE LA CROUZILLE (à droite)

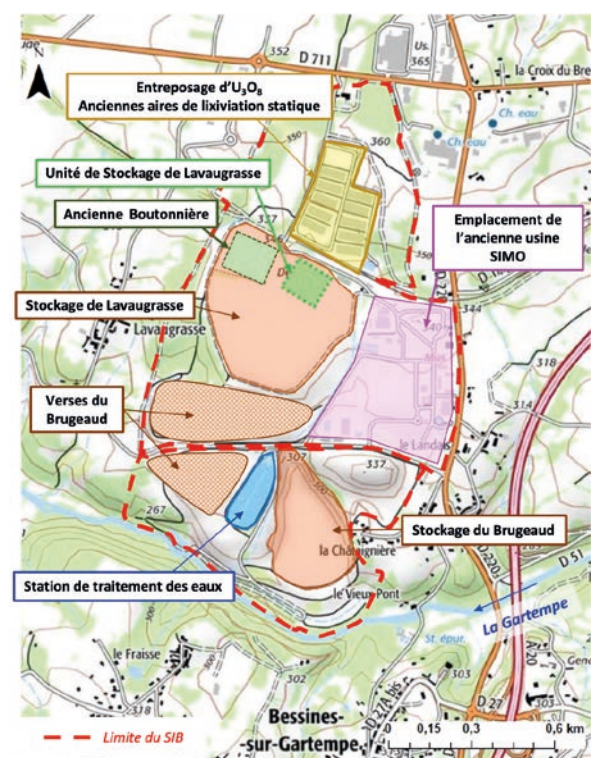


Présentation générale du Site Industriel de Bessines

Le Site Industriel de Bessines se trouve sur la commune de Bessines-sur-Gartempe (Haute-Vienne), le long de la rivière de la Gartempe. Couvrant une surface d'environ 159 ha, ce site, préalablement reconnu par des travaux de recherche en 1953-1954, a été exploité par des travaux miniers souterrains de 1955 et 1967 et par une mine à ciel ouvert (appelée MCO du Brugeaud) entre 1957 et 1972. Ces travaux miniers ont permis d'extraire 2 124 tonnes d'uranium métal à partir de 1 779 474 tonnes de minerai et 1 241 760 tonnes de pseudo-minerai.

À partir de juin 1958, une usine de traitement du minerai installée sur le site (figure 5), dont la gestion a été confiée à la Société Industrielle des Minerais de l'Ouest (SIMO), a permis de traiter 14,56 millions de tonnes de minerais provenant majoritairement des sites miniers de la Division Minière de la Crouzille (tableau 2). Cette activité de traitement dynamique du minerai en usine (broyage suivi d'une attaque chimique), réservé aux minerais riches, a été complétée par de la lixiviation statique du minerai pauvre réalisée, d'une part au niveau de verses sur le site avant 1982 et d'autre part au niveau d'aires de lixiviation statique dédiées, localisées au nord du site de 1982 à 1991 (figure 5). Les jus récupérés par la lixiviation étaient envoyés à l'usine SIMO pour en extraire l'uranium. En complément, la lixiviation *in situ* du minerai a été réalisée dans les travaux miniers souterrains du site et a permis d'extraire 96 tonnes d'uranium.

FIGURE 5 / LOCALISATION DES DIFFÉRENTES INSTALLATIONS ET STOCKAGES PRÉSENTS SUR LE SITE DU SIB



Vue aérienne du Site Industriel de Bessines en 1978.



Vue aérienne du Site Industriel de Bessines en 2010.

TABLEAU 2 / TONNAGE DES DIFFÉRENTS PRODUITS ISSUS DE LA MINE DU SIB ET DES INSTALLATIONS DE TRAITEMENT

Uranium extrait par l'exploitation minière du SIB (tonnes)	Tonnage de minerai traité à l'usine du SIB (tonnes)	Uranium produit dans l'usine (tonnes)	Résidus de traitement dynamique stockés sur le site du SIB (millions de tonnes)	Résidus de traitement statique stockés sur le site du SIB (millions de tonnes)
2 124 <i>soit 2,5 % de la production française</i>	14 560 000	26 050	11,454 <i>soit 37,4 % des résidus de traitement dynamique produits en France</i>	8,572 <i>soit 47,7 % des résidus de traitement statique produits en France</i>

Les résidus de traitement dynamique produits par l'usine SIMO ont été stockés au fur et à mesure de leur production dans différents stockages de la division de la Cruzille dont deux stockages se trouvent sur le site du SIB. Ainsi il y a :

- **le stockage de Lavaugrasse** qui a été créé par édification d'une digue en stériles et sables cyclonés en travers d'une dépression. Ce stockage a permis de stocker 5 678 000 tonnes de résidus de traitement dynamique issus de l'usine de 1958 à 1978. Des stériles miniers provenant des verses d'autres sites situés à proximité ont été utilisés comme matériaux de couverture (1 807 000 tonnes) ;
- **le stockage du Brugeaud** qui est constitué par la mine à ciel ouvert du Brugeaud et a permis le stockage de 5 776 000 tonnes de résidus de traitement dynamique issus de l'usine de 1978 à 1987. Afin d'augmenter la capacité de stockage de la Mine à ciel ouvert (MCO), une digue en sables cyclonés rehaussant la MCO dans sa partie sud a été construite. Des stériles miniers provenant des verses d'autres sites situés à proximité ont été utilisés comme matériaux de couverture (1 512 000 tonnes) ;

Les stockages de Lavaugrasse et du Brugeaud contiennent également des résidus (9 500 tonnes) issus du traitement de minerais, provenant pour partie du Limousin et du Forez, réalisé à l'usine CEA du Bouchet (Essonne) et qui ont été transportés au SIB de 1973 à 1978 pour y être stockés. En outre, les verses du Brugeaud (figure 5) contiennent des résidus de traitement par lixiviation en tas (5 253 000 tonnes) provenant du site du SIB, des terres, gravats (16 790 tonnes) et ferrailles (1 900 tonnes) provenant du démantèlement de l'usine du Bouchet, ainsi que 18 048 fûts de déchets de très faible activité (TFA) provenant du site de Pierrelatte (contenant du vinyle, chiffons, cotons, gravats, bétons, sépiolites et granule d'alumine contaminés en uranium). Les stockages de Lavaugrasse et du Brugeaud ainsi que les verses du

Brugeaud constituent trois installations classées à la rubrique n° 1735 du régime des Installations classées pour la protection de l'environnement (« ICPE 1735 ») et sont soumis à une surveillance réglementaire.

Les MCO des sites de Montmassacrot et de Bellezane (figure 4) ont également servi à stocker les résidus de traitement dynamique produits par l'usine SIMO de 1986 à 1989 et de 1988 à 1993 respectivement.

L'usine SIMO a été arrêtée en juillet 1993 et la majeure partie des travaux de réaménagement du SIB a été effectuée jusqu'en 1996. Les produits de démantèlement de l'usine ont été stockés sur une plateforme dédiée, recouverte de stériles, située sur la partie nord du stockage du Brugeaud.

Les installations encore en fonctionnement actuellement sur le SIB consistent en une station de traitement des eaux et deux installations classées ICPE 1735 :

- un entreposage d'oxyde d'uranium appauvri (U_3O_8) issu de la phase d'enrichissement de l'uranium réalisée sur le site du Tricastin (vallée du Rhône), exploité depuis 1998, localisé au niveau des anciennes aires de traitement du minerai par lixiviation statique (figure 5). Cette installation a été autorisée en 1995 à entreposer 199 900 tonnes d'oxyde d'uranium appauvri. Cette capacité d'entreposage a été augmentée en 2018 à 260 000 tonnes ;
- une installation de stockage de boues et de résidus de traitement dite « Unité de Stockage de Lavaugrasse » (USL). Cette installation d'une capacité de 35 000 m³, dont la construction a été autorisée en janvier 2019, est dédiée aux boues radiologiquement marquées provenant des stations de traitement des eaux de la Haute-Vienne ainsi qu'aux résidus de traitement de minerai issus des activités de recherche d'Orano Mining à hauteur de 2 500 m³. Cette installation est

située dans la partie nord du stockage de résidus de Lavaugrasse et au sud des bâtiments d'entreposage d'uranium appauvri (U_3O_8) (figure 5). Jusqu'en 2010, les boues étaient stockées dans la partie nord-ouest du stockage de Lavaugrasse dans une boutonnière⁽²⁾ fermée depuis (figure 5).

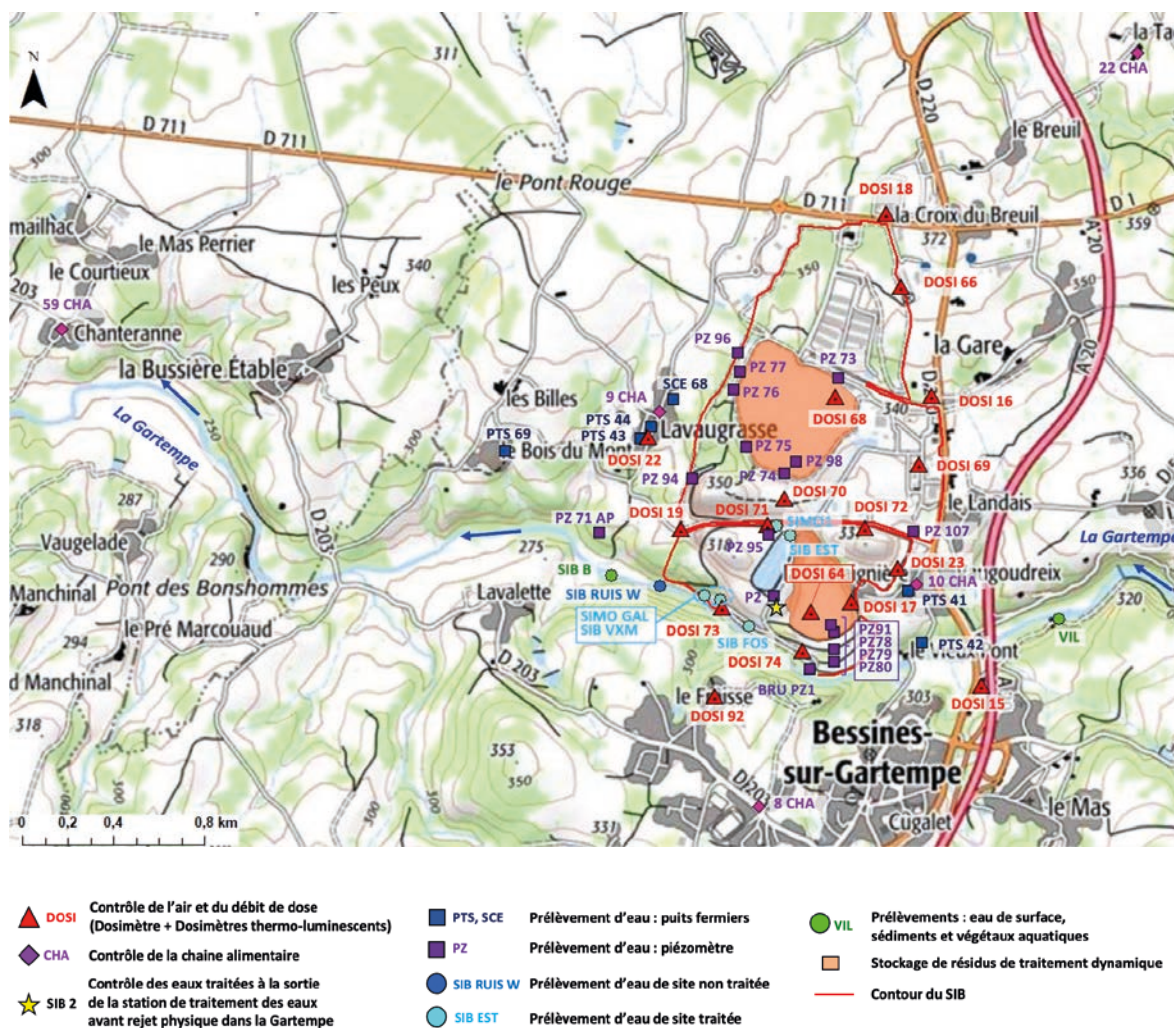
Par ailleurs, une partie du site, localisée à l'ancien emplacement de l'usine SIMO (figure 5), a été valorisée avec l'installation de différentes activités industrielles et d'études du groupe Orano telles que l'Après-Mines France (Orano Mining), le Centre d'Innovation en Métallurgie Extractive (CIME) ou le laboratoire Maurice

Tubiana. De plus, des projets d'installation de parcs photovoltaïques sur les deux stockages de résidus sont en cours.

Plan de surveillance

L'ancien site minier, les stockages de Lavaugrasse et du Brugeaud et les verses du Brugeaud du site du SIB sont soumis à une surveillance réglementaire prescrite par arrêté préfectoral dont la version actuellement en vigueur est datée du 11 février 2019. Le plan de surveillance présenté dans le tableau 3 et la figure 6, impose le suivi :

FIGURE 6 / PLAN DE SURVEILLANCE ACTUEL DU SITE DU SIB



(2) Zone, à l'aplomb du stockage, dépourvue de couverture solide dont l'objectif est de permettre le stockage des boues issues du traitement des eaux.

- des eaux du site (eaux de ruissellement, eaux des travaux miniers, eaux de drainage du stockage de résidus) ;
- du rayonnement gamma sur et autour du site ;
- de la qualité de l'air sur et autour du site (radon et poussières) ;
- du milieu aquatique autour du site (rivière la Gartempe) ;
- de la chaîne alimentaire autour du site ;
- des eaux souterraines (au droit du site et dans l'environnement).

À la surveillance effectuée par Orano Mining en application de l'arrêté préfectoral s'ajoutent la surveillance semestrielle réalisée par l'IRSN dans le cadre de sa mission propre de surveillance radiologique du territoire, ainsi que des analyses ponctuelles notamment dans le cadre de contrôles inopinés effectués par la Dreal.

TABLEAU 3 / MESURES RÉALISÉES SUR ET AUTOUR DU SITE DU SIB
(cf. figures 6 et 9 pour la localisation des points, et figure 11 pour le point PDB)

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Orano Mining	IRSN	DREAL
Eaux du site	<p>Surveillance réglementaire</p> <p><u>Au rejet (point SIB2), mesures :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • hebdomadaires sur un échantillon moyen hebdomadaire : pH, débit hebdomadaire rejeté, °C, sulfates, uranium soluble, ²²⁶Ra soluble, baryum ; • mensuelles sur un échantillon moyen hebdomadaire : uranium insoluble, ²²⁶Ra insoluble, manganèse et composés, fer, aluminium et composés ; • mensuelles sur un échantillon ponctuel : MES. <p><u>À la STE, avant le traitement des eaux (point SIMO 1), mesures :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • mensuelles sur un échantillon moyen mensuel : pH, sulfates, uranium soluble, ²²⁶Ra soluble ; • trimestrielles sur un échantillon moyen mensuel : uranium insoluble, ²²⁶Ra insoluble. <p><u>Eaux du site collectées avant traitement (points SIB Est, SIB VXM, SIMOGAL), mesures :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • trimestrielles sur un échantillon ponctuel : débit hebdomadaire, pH, °C, sulfates, uranium soluble, ²²⁶Ra soluble ; • semestrielles sur un échantillon ponctuel : uranium insoluble, ²²⁶Ra insoluble. <p><u>Eaux pluviales du site avant rejet dans la Gartempe (point SIB RUIS W), mesures :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • trimestrielles sur un échantillon ponctuel : pH, MES, sulfates, uranium soluble, ²²⁶Ra soluble. <p><u>Auto-surveillance :</u> point SIB FOS : mesures mensuelles du pH, uranium soluble et ²²⁶Ra soluble</p>		<p>Contrôles inopinés (2010 et 2012) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2010 : 1 point de prélèvement sur site (eau et sédiment). Eau : mesures ponctuelles de l'uranium et du ²²⁶Ra. Sédiment : mesures ponctuelles des radionucléides de la chaîne de l'uranium-238. • 2012 : 2 points de prélèvement d'eau du site (SIB 2, SIB VXM). Mesures ponctuelles de l'uranium, du ²²⁶Ra, sulfates. MES, alpha global, bêta global, baryum, DCO et HC pour SIB 2 en complément.
Rayonnement gamma	<p>Surveillance réglementaire</p> <p>20 stations de mesure : 3 dans le milieu naturel, 7 au niveau des villages environnants et 10 sur le site</p>		
Air (radon-222 et radon-220, poussières)	<p>Surveillance réglementaire</p> <p>20 stations de mesure : 3 dans le milieu naturel, 7 au niveau des villages environnants et 10 sur le site</p> <p>Mesures mensuelles de l'EAP ²²²Rn, de l'EAP ²²⁰Rn et des poussières</p>		

Milieu surveillé ou nature du contrôle	Orano Mining	IRSN	DREAL
Milieu aquatique	<p>Surveillance réglementaire</p> <p><u>Eaux</u> : 2 points de prélèvement (VIL et SIB B) Mesures de l'uranium (soluble et insoluble), ^{226}Ra (soluble et insoluble), pH, conductivité, sulfates, baryum (SIB B uniquement).</p> <p><u>Fréquence</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • au point VIL : semestrielle ; • au point SIB B : mensuelle sauf pour l'uranium insoluble, trimestrielle. <p><u>Sédiments</u> : 2 points de prélèvement (VIL et SIB B), mesures annuelles (^{238}U, ^{226}Ra, ^{210}Pb)</p> <p><u>Bio-indicateurs (végétaux aquatiques)</u> : 2 points de prélèvement (VIL et SIB B), mesures annuelles (^{226}Ra, ^{238}U, ^{210}Pb)</p>	<p>Surveillance de l'environnement</p> <p>2 points de mesure de l'eau de la Gartempe en amont (depuis 2019) et en aval (depuis 2009) du site</p> <p>Mesures de l'uranium, du ^{226}Ra, de la radioactivité alpha globale, de l'^{235}U et de l'^{234}U</p>	<p>Contrôles inopinés (2010 et 2012) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2010 : 3 points de prélèvement de sédiments dans la Gartempe. Mesures ponctuelles des radionucléides de la chaîne de l'uranium-238. • 2012 : 2 points de prélèvement d'eau de la Gartempe (SIB B, Pont des Bonshommes (PDB)). Mesures ponctuelles de l'uranium, du ^{226}Ra. Mesures ponctuelles des sulfates PDB).
Milieu terrestre (chaîne alimentaire)	<p>Surveillance réglementaire</p> <p>5 villages (Points 8 CHA, 9 CHA, 10 CHA, 22 CHA, 59 CHA) + Station(s) « Milieu naturel »</p> <p>Mesures annuelles (^{238}U, ^{230}Th, ^{226}Ra et ^{210}Pb)</p>		
Eaux souterraines	<p>Surveillance :</p> <ul style="list-style-type: none"> • de la charge hydraulique des digues des stockages de Lavaugrasse et du Brugeaud : 7 piézomètres (PZ74, PZ75, PZ76, PZ77, PZ78, PZ79 et PZ80). Mesure trimestrielle du niveau piézométrique. <p>Auto-surveillance : PZ91, PZ94, PZ95, PZ96, PZ98</p> <ul style="list-style-type: none"> • de la qualité des eaux souterraines autour des stockages de Lavaugrasse et du Brugeaud : 11 points (PZ107, PZ73, P2, BRU PZ1, PZ71, PTS41, PTS42, PTS43, PTS44, PTS 69 et SCE 68). <p>Mesures du niveau piézométrique, pH, °C, sulfates, uranium soluble et ^{226}Ra soluble.</p> <p>Mesures mensuelles pour BRU PZ1 et PZ71.</p> <p>Mesures semestrielles pour PZ107, PZ73, P2, PTS41, PTS42, PTS43, PTS44, PTS 69 et SCE 68.</p>		

Rayonnement gamma et qualité de l'air

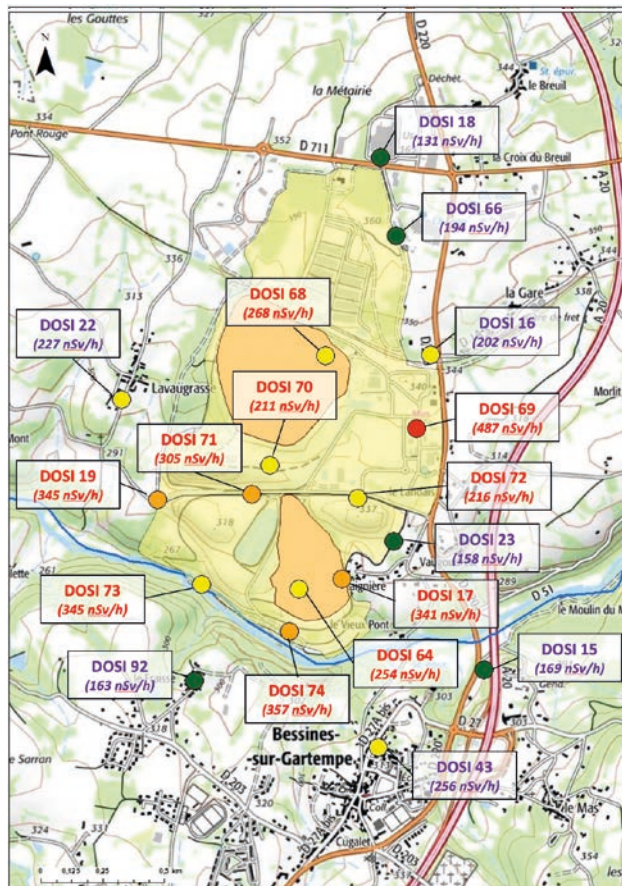
Pour la période 2009-2019, le débit d'équivalent de dose moyen varie entre 211 et 487 nSv/h pour les stations de mesure localisées sur le site et de 131 à 256 nSv/h pour celles localisées dans les villages autour du site (figure 7). Le débit d'équivalent de dose moyen de référence, mesuré au niveau des stations dites « milieu naturel »⁽³⁾ varie quant à lui entre 176 et 192 nSv/h.

Les différentes valeurs mesurées sur le site sont globalement plus élevées qu'au niveau des villages environnants, du fait en particulier de la nature des sols au niveau des stations de mesures (réaménagement

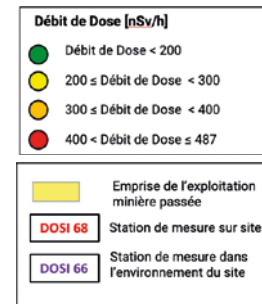
du site avec des stériles). La station présentant les débits d'équivalent de dose les plus élevés se situe au niveau de l'emplacement de l'ancienne usine SIMO qui a été réaménagée (i.e. DOSI 69, figure 7).

Pour les villages environnants, la station présentant les débits d'équivalent de dose les plus élevés se situe à Bessines-sur-Gartempe au niveau du dosimètre 43 localisé à 400 m environ du site (figure 7). En raison de la distance, ce débit de dose ne peut résulter du rayonnement émis par le site. Il s'explique plus vraisemblablement par une variation naturelle locale du débit de dose (cf. focus chapitre 2 pp. 50-52), les résultats des dosimètres environnants 92 et 15 (163 nSv/h et 169 nSv/h) se trouvant même inférieurs à la gamme observée sur les stations « milieu naturel ».

FIGURE 7 / MOYENNE 2009-2019 DES DÉBITS D'ÉQUIVALENT DE DOSE MESURÉS PAR ORANO SUR ET AUTOUR DU SITE DU SIB (nSv/h)



Avec DOSI 43 : point de surveillance de l'exploitant stoppé en 06/2019 localisé à Bessines sur Gartempe



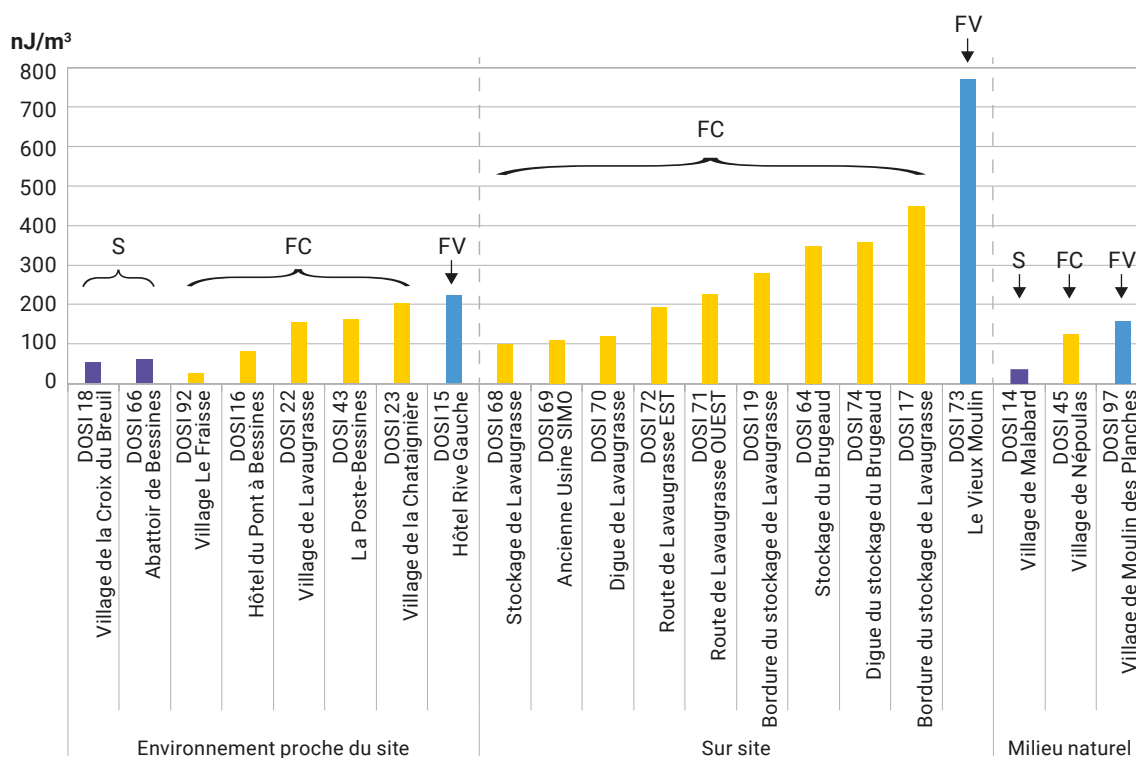
(3) Localisées dans les villages de Malabard, Népoulas et au Moulin des Planches.

Les mesures de l'EAP du ^{222}Rn sur et autour du site illustrent l'influence de la topographie sur la mesure de cette grandeur (figure 8). Ainsi les moyennes les plus élevées se retrouvent au niveau des stations localisées en fond de vallée, situation peu favorable à la dispersion du radon dans l'air. À l'opposé, les moyennes les plus basses correspondent aux stations localisées en position sommitale, plus favorable à la dispersion du radon. Ainsi, les valeurs moyennes de l'EAP du ^{222}Rn pour 2009-2019 varient entre 55 et 62 nJ/m³, 26 et 205 nJ/m³ et 224 nJ/m³ dans les

villages en fonction de leur situation topographique soit sommitale, flanc de coteau et fond de vallée respectivement (figure 8). Pour les trois stations de référence en « milieu naturel » elles sont de 35, 126, 158 nJ/m³ respectivement.

Sur le site, les valeurs de l'EAP du ^{222}Rn pour 2009-2019 varient entre 99 et 450 nJ/m³ pour les stations de mesure en flanc de coteau et la station de mesure en fond de vallée présente une valeur moyenne de 772 nJ/m³ (figure 8).

FIGURE 8 / MOYENNE 2009-2019 DES MESURES DE L'EAP ^{222}Rn (nJ/m³) RÉALISÉES AU NIVEAU DES STATIONS LOCALISÉES SUR LE SITE DU SIB, DANS SON ENVIRONNEMENT PROCHE ET AU NIVEAU DES STATIONS DITES « MILIEU NATUREL »



S : Station de mesure localisée en position sommitale
FC : Station de mesure localisée à flanc de coteau
FV : Station de mesure localisée en fond de vallée

Les eaux de surface

Une partie des eaux du site est collectée et dirigée vers la station de traitement des eaux (STE) pour réduire les activités de radium-226 et les concentrations en uranium afin de respecter les limites réglementaires de rejet de 600 µg/L pour l'uranium soluble et 250 mBq/L pour le radium-226 soluble (limites applicables aux prélèvements moyens hebdomadaires). Avant l'application de l'arrêté préfectoral du 11/02/2019, ces valeurs limites étaient de 800 µg/L pour l'uranium soluble et 250 mBq/L pour le radium-226 soluble en moyenne annuelle.

Les eaux collectées proviennent de deux secteurs (figure 9) :

- le secteur du Brugeaud qui comprend :
 - les eaux de résurgence drainées en pied de digue du stockage du Brugeaud, les eaux de résurgence du fossé sud (point de prélèvement SIB FOS) et les eaux du puisard de l'ancien lit de la Gartempe,

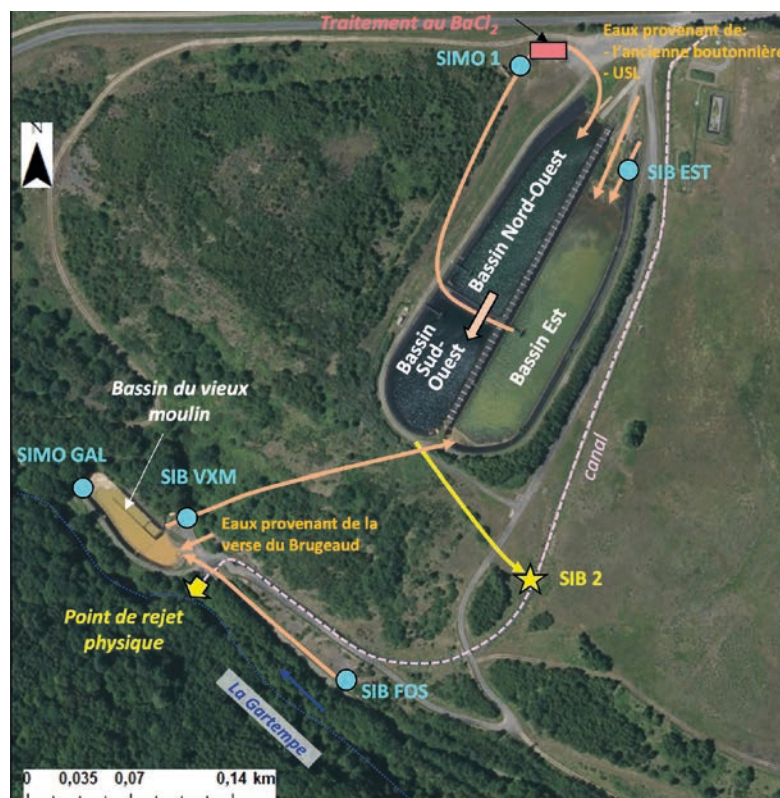
- les eaux d'infiltration drainées en pied de la verse du Brugeaud,
- et les eaux d'exhaure des travaux miniers souterrains (point de prélèvement SIMO GAL).

Ces eaux sont dirigées vers le bassin du Vieux Moulin situé au sud-ouest du site où elles subissent une première décantation avant d'être pompées et acheminées vers le bassin est (point de prélèvement SIB VXM) de la STE. Ce traitement passif consiste en une précipitation du fer et du manganèse et un piégeage de l'uranium par les hydroxydes et oxyhydroxydes préalablement formés ;

- le secteur de Lavaugrasse qui comprend :
 - les eaux provenant de l'ancienne boutonnière,
 - les eaux de ruissellement et d'infiltration (point de prélèvement SIB EST),
 - les eaux de lixiviation issues de l'USL.

Ces eaux sont dirigées vers le bassin est de la STE sans traitement préalable.

FIGURE 9 / STATION DE TRAITEMENT DES EAUX DU SIB



Les eaux du bassin est (contrôlées au point SIMO 1) sont ensuite dirigées vers la STE pour y subir un traitement dit actif par ajout de chlorure de baryum. Ce traitement consiste à diminuer l'activité du radium-226 par précipitation-décantation dans les bassins nord-ouest et sud-ouest.

Les eaux en sortie de STE sont contrôlées au point SIB 2 et rejoignent le canal de rejet dans la rivière la Gartempe. Ce canal récupère également les eaux de rejet des autres installations de l'Établissement de Bessines. La station de traitement des eaux du SIB a traité en moyenne, sur la période 2009-2019, 390 000 m³ d'eau par an.

Les figures 10 et 11 montrent que les eaux prélevées au point SIB FOS présentent des concentrations en uranium nettement plus faibles (70 µg/L en moyenne) que celles des eaux d'exhaure des travaux miniers souterrains (point SIMO GAL : 1 090 µg/L en moyenne). Le traitement passif dans le bassin du Vieux Moulin permet d'obtenir une concentration en uranium comprise entre 160 et 327 µg/L en moyenne annuelle en sortie du bassin (point SIB VXM, figure 10). Le traitement au chlorure de baryum permet de diminuer efficacement l'activité du radium-226. Ainsi, grâce à celui-ci, l'activité du radium diminue de 52 à 91 % (figure 10).

Il est à noter qu'il y a eu un dépassement de la limite réglementaire en uranium dans les prélèvements hebdomadaires réalisés entre juin et octobre 2019 au point de rejet de la STE (SIB 2) (figure 12). Ce dépassement est concomitant au pompage et à la déshydratation des boues présentes dans les bassins est et nord-ouest de la STE (figure 9) en vue d'un transfert vers l'USL.

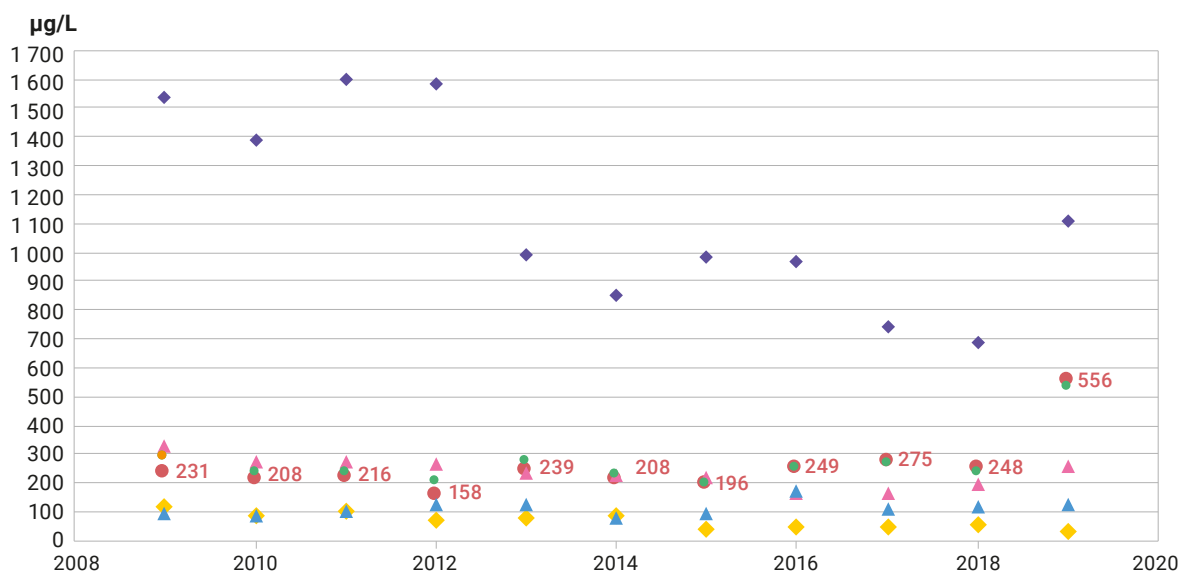
Les mesures montrent également qu'en fonctionnement normal et en l'absence d'intervention au niveau des bassins, le rejet a, de façon générale, peu d'influence sur la concentration en uranium et sur l'activité du radium-226 dans les eaux de la Gartempe (figure 11) en aval du point de rejet (points SIB B, PDB B, figures 11 à 13). Ainsi les moyennes⁽⁴⁾, pour la période 2009-2019, de ces deux paramètres sont du même ordre de grandeur aux points SIB B (U = 4,2 µg/L et ²²⁶Ra = 30,3 mBq/L) et PDB (U = 3,3 µg/L et ²²⁶Ra = 24,6 mBq/L) situés en aval, qu'au point VIL (U = 2,6 µg/L et ²²⁶Ra = 24 mBq/L) situé en amont du site. En revanche, les chroniques de mesure de l'uranium au point SIB B montrent une augmentation de la concentration en uranium dans la Gartempe entre juin et octobre 2019 (figure 12) due à l'augmentation de la concentration en uranium dans le rejet pendant les travaux sur la STE (cf. ci-dessus) avec une concentration maximale en septembre 2019 de 77 µg/L (figure 12).



Station de Traitement des Eaux du SIB

(4) Sans tenir compte des résultats de mesures réalisées par Orano Mining en complément de la surveillance réglementaire lors des travaux de pompage et déshydratation des boues des bassins.

FIGURE 10 / MOYENNES ANNUELLES DES CONCENTRATIONS EN URANIUM ($\mu\text{g/L}$) ET DES ACTIVITÉS EN RADIUM-226 (mBq/L) ENTRE 2009 ET 2019 AVANT TRAITEMENT ET APRÈS TRAITEMENT



Eaux traitées dans le bassin du Vieux Moulin

- ◆ Eaux de résurgence fossé Sud (point SIB FOS)
- ◆ Eaux d'exhaure des travaux miniers souterrains (point SIMO GAL)
- ▲ Eaux en sortie du bassin du Vieux Moulin (point SIB VXM)
- ▲ Eaux de ruissellement et d'infiltration sur le secteur de Lavaugrasse (point SIB EST)
- Eaux en entrée de station (point SIMO1)
- Rejet après traitement (SIB 2)



Eaux traitées dans le bassin du Vieux Moulin

- ◆ Eaux de résurgence fossé Sud (point SIB FOS)
- ◆ Eaux d'exhaure des travaux miniers souterrains (point SIMO GAL)
- ▲ Eaux en sortie du bassin du Vieux Moulin (point SIB VXM)
- ▲ Eaux de ruissellement et d'infiltration sur le secteur de Lavaugrasse (point SIB EST)
- Eaux en entrée de station (point SIMO1)
- Rejet après traitement (SIB 2)

FIGURE 11 / MOYENNE DES MESURES EN URANIUM ($\mu\text{g/L}$) ET EN RADIUM-226 (mBq/L) RÉALISÉES ENTRE 2009 ET 2019 DANS LA GARTEMPE (points en bleu), DANS LES EAUX DU SITE (points en violet) ET AU REJET (points en rouge)

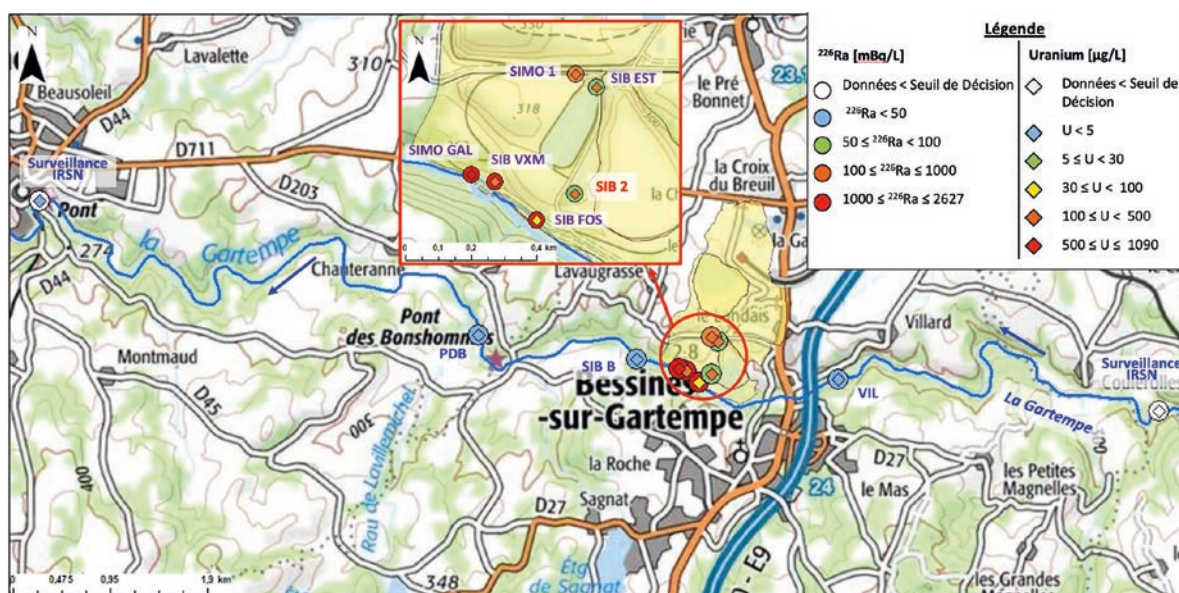


FIGURE 12 / CONCENTRATION EN URANIUM, ENTRE 2009 ET 2019, AU NIVEAU DU REJET ET DANS LA GARTEMPE ($\mu\text{g/L}$)

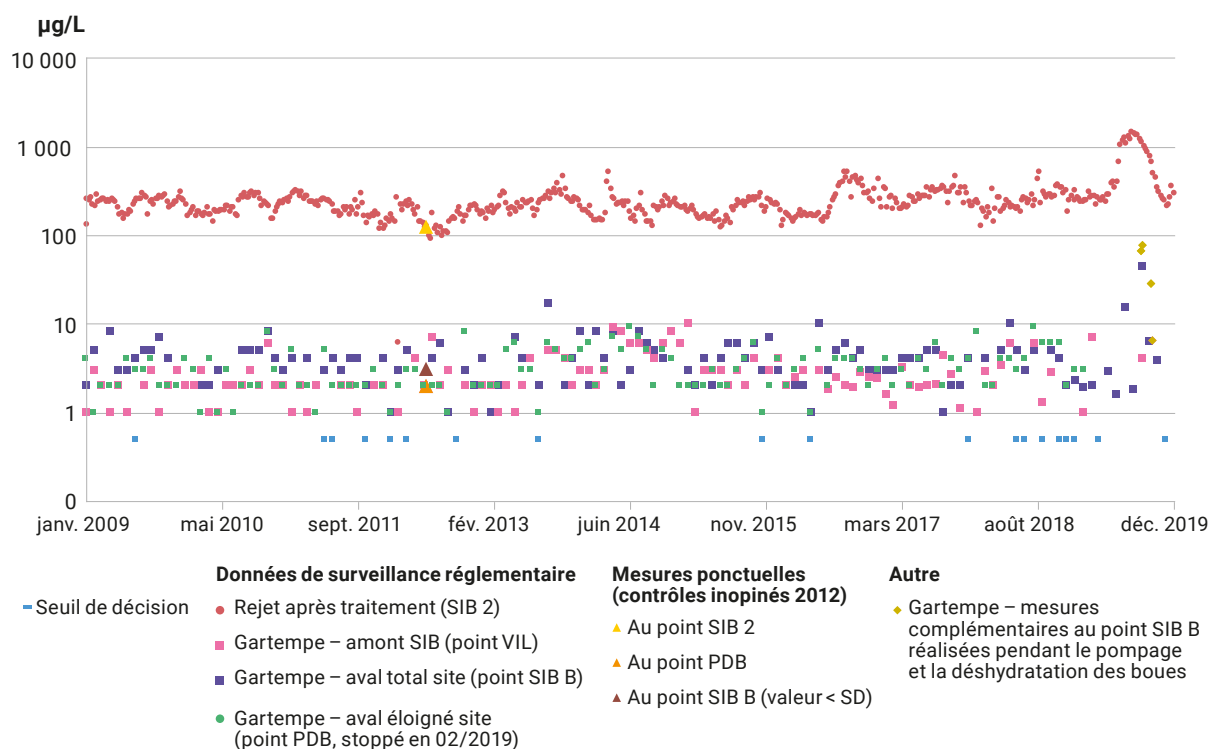
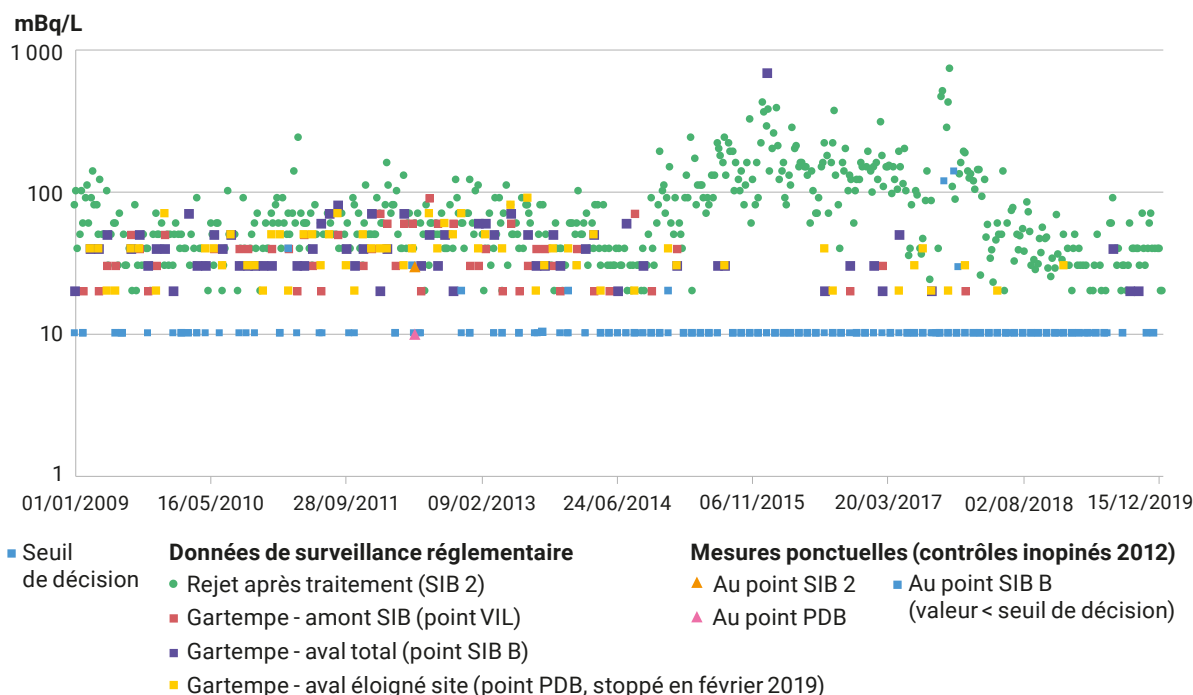


FIGURE 13 / ACTIVITÉ DU RADIUM-226, ENTRE 2009 ET 2019, AU NIVEAU DU REJET ET DANS LA GARTEMPE (mBq/L)



Les sédiments

Les résultats de la surveillance des sédiments de la Gartempe, entre 2009 et 2019, indiquent que les activités moyennes en uranium-238 et en radium-226 sont plus élevées au point PDB B situé en aval du point de rejet (tableau 4) qu'au point VIL et à Coulerolles, situés en amont du site (points).

La chaîne alimentaire

La figure 14 présente les activités du radium-226 et de l'uranium-238 mesurées dans certaines denrées (productions agricoles) prélevées autour du site. Depuis 2009, les mesures sont faites sur des échantillons constitués de plusieurs prélèvements de denrées de même catégorie issues de plusieurs villages localisés autour du site du SIB (La Croix du Breuil, Abattoir, Hôtel du Pont, Lavaugrasse, La Chataignière, Bessines-La Poste, Le Fraisse [Bessines] et Villard).

Les activités du radium-226 sont comprises :

- entre 0,11 et 0,47 Bq/kg frais pour les pommes ;
- entre 0,16 et 0,60 Bq/kg frais pour les choux ;
- entre 0,56 et 3,84 Bq/kg frais pour les carottes.

Les activités de l'uranium-238 sont comprises :

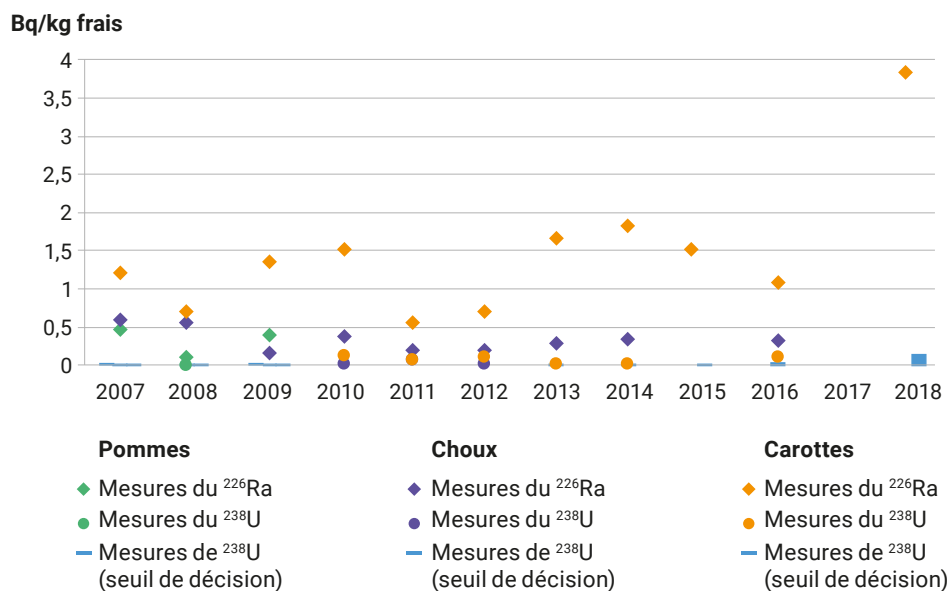
- entre 0,0045 (seuil de décision) et 0,02 Bq/kg frais les pommes ;
- entre 0,0035 (seuil de décision) et 0,07 Bq/kg frais pour les choux ;
- entre 0,002 (seuil de décision) et 0,14 Bq/kg frais pour les carottes.

De manière générale, ces activités sont modérées au regard de ce qui peut être observé dans des régions à haut niveau de radioactivité naturelle (cf. chapitre 2, figure 17 p. 75). Ainsi, les activités massiques d'uranium présentées ci-dessus, se situent entre les niveaux observés dans les zones présentant de hauts niveaux de radioactivité naturelle et ceux observés dans des zones du territoire moins riches en uranium. Il en est de même des activités de radium-226 mesurées dans les choux et les pommes. La valeur de 3,84 Bq/kg de radium-226 mesurée dans l'échantillon de carottes est élevée. Toutefois, il est possible qu'elle résulte d'un lavage insuffisant de l'échantillon ; la présence de quelques particules de terre adhérentes aux carottes suffirait à expliquer une telle valeur.

TABLEAU 4 / ACTIVITÉS MASSIQUES MOYENNES EN URANIUM-238 ET EN RADIUM-226 DANS LES SÉDIMENTS DE LA GARTEMPE ENTRE 2009 ET 2019 (Bq/kg sec)

Nom des points de prélèvement	Surveillance Orano Mining (2009-2019)	
	²³⁸ U (Bq/kg sec)	²²⁶ Ra (Bq/kg sec)
La Gartempe – Amont de tous les sites du bassin versant de la Gartempe, à Coulerolles	moyenne : 50,5 [min : < 25 ; max : 70]	moyenne : 45,9 [min : < 15 ; max : 90]
La Gartempe – Amont site SIB (VIL)	moyenne : 61,4 [min : < 25 ; max : 130]	moyenne : 58,2 [min : 40 ; max : 100]
La Gartempe – Aval site au pont des Bonshommes (PDB)	moyenne : 162 [min : 110 ; max : 360]	moyenne : 147 [min : 90 ; max : 350]

FIGURE 14 / ACTIVITÉS DU RADIUM-226 ET DE L'URANIUM-238 DE DIVERSES DENRÉES AUTOUR DU SITE DU SIB





06

ÉLÉMENTS D'ACTUALITÉ SUR LA PÉRIODE 2018-2020

6.1. INCENDIES DE FORÊT EN UKRAINE DANS LA RÉGION DE TCHERNOBYL EN AVRIL 2020	336
6.2. REJET ACCIDENTEL DE SÉLÉNIUM-75 PAR UNE INSTALLATION BELGE EN MAI 2019	339
6.3. INCENDIE SUR LE SITE DE LA HAGUE EN FÉVRIER 2020	343
6.4. INCENDIE DANS LE SOUS-MARIN « PERLE » À TOULON EN JUIN 2020	347
Mesures du réseau de surveillance de l'IRSN.....	347
Campagne réactive de mesures <i>in situ</i>	348
Mesures réactives dans le véhicule laboratoire « environnement » et mesures différées dans les laboratoires fixes de l'IRSN	349
6.5. ÉTUDE SUR LE TRITIUM DANS LES NAPPES PHRÉATIQUES	351
6.6. CAMPAGNE D'ÉTUDE DU TRITIUM DANS LA LOIRE À SAUMUR.....	359

06

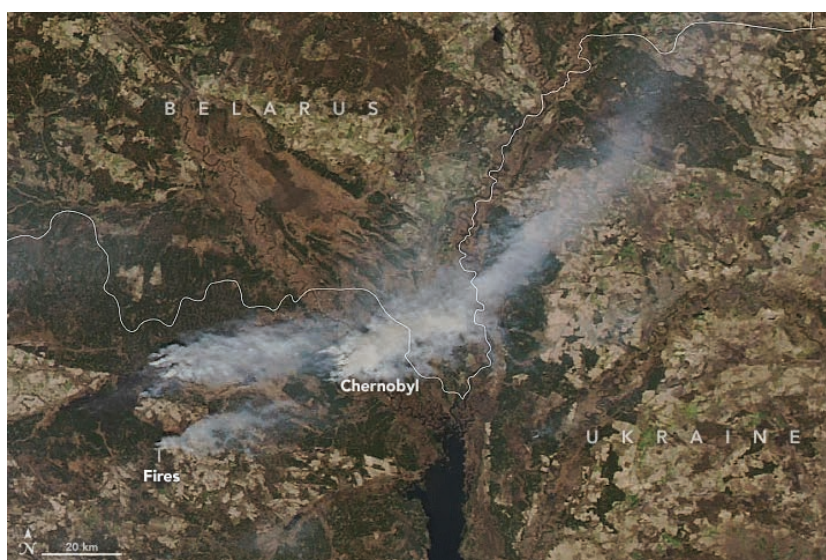
ÉLÉMENTS D'ACTUALITÉ SUR LA PÉRIODE 2018-2020

6.1. INCENDIES DE FORÊT EN UKRAINE DANS LA RÉGION DE TCHERNOBYL EN AVRIL 2020

Début avril 2020, des incendies de forêt ont commencé à faire rage dans le nord de l'Ukraine, notamment dans la zone la plus contaminée par les retombées de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl, évacuée en 1986 et délimitée par une zone oblongue de 2 600 km² englobant le site de la centrale (figures 1 et 2). Les incendies se sont propagés pendant environ 4 semaines, pénétrant dans la zone d'exclusion de Tchernobyl (CEZ) jusqu'à proximité de la centrale et des installations de stockage des déchets radioactifs.

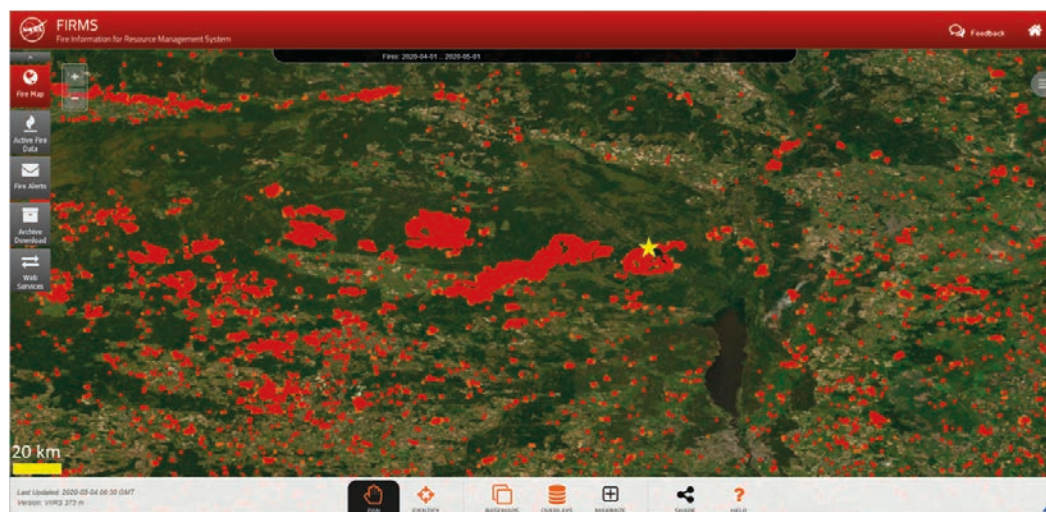
Les incendies ont finalement été éteints par des précipitations soutenues qui ont considérablement aidé les pompiers. Selon l'Institut hydrométéorologique ukrainien (UHMI), environ 870 km² (87 000 ha) ont été détruits dont 65 km² à proximité immédiate de la centrale et 20 autres km² sur la rive est de la rivière Pripjat. Les incendies de forêt peuvent réémettre des quantités importantes de radionucléides artificiels (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, isotopes de plutonium et ²⁴¹Am) et naturels (²¹⁰Po notamment) dans l'atmosphère. Ces radionucléides sont stockés principalement dans les couches de terre superficielles, dans la litière forestière et dans une moindre mesure dans la biomasse.

FIGURE 1 / IMAGE SATELLITE DES FEUX DU 9 AVRIL 2020 DANS LA RÉGION DE TCHERNOBYL



© NASA Earth Observatory images, Lauren Dauphin, utilisation des données MODIS data de la NASA EOSDIS/LANCE et GIBS/Worldview.

**FIGURE 2 / REPRÉSENTATION CUMULÉE DES DÉTECTIONS DE FEUX ACTIFS À PARTIR DES DONNÉES SATELLITES MODIS ET VIIRS ENTRE LE 1^{ER} AVRIL ET LE 1^{ER} MAI 2020.
SOURCE DES DONNÉES : NASA/FIRMS (Fire Information for Resource Management System).
LA CENTRALE DE TCHERNOBYL EST SIGNALÉE PAR UNE ÉTOILE JAUNE.**



À partir de 1 200 résultats de mesure de la concentration de ^{137}Cs dans l'air en Europe communiqués par 19 pays, l'IRSN a pu remonter à une estimation de la quantité de ce radionucléide émise lors de ces incendies (terme source) en utilisant des modèles de dispersion atmosphérique. Cette modélisation « inverse » a permis d'estimer le terme source en ^{137}Cs entre 0,7 et 1,2 TBq émis dans l'air par l'ensemble des foyers d'incendies. Cette estimation coïncide avec celle obtenue en Belgique par le Centre d'étude pour l'énergie nucléaire belge SCK-CEN (1 TBq), également par modélisation inverse. Elle correspond également à l'estimation de 690 à 945 GBq faite par l'organisme Ukrainien (UHMI)⁽¹⁾, basée sur les cartes historiques de contamination des territoires, les superficies brûlées ainsi que la distribution spécifique des radionucléides dans la végétation. Aucune concentration de ^{90}Sr ou de Pu dans l'air n'a été signalée en dehors de l'Ukraine, ce qui empêche l'utilisation de la même méthodologie pour estimer le terme source de ces radionucléides. Cependant, une quarantaine de mesures en ^{90}Sr et une trentaine en Pu dans l'air ont été rapportées dans la zone d'exclusion de Tchernobyl. Contre toute attente, un terme source en ^{90}Sr seulement 2 fois plus faible que celui du ^{137}Cs a été estimé : 480 GBq dans une gamme allant de 345 à 612 GBq (les dépôts de strontium-90 suite à l'accident de Tchernobyl ayant été beaucoup plus faibles que ceux de césium-137, l'activité de strontium-90 susceptible d'être émise lors

d'un incendie était considérée comme beaucoup plus faible). Ce terme source reste plus important que celui trouvé par d'autres scientifiques et a des conséquences sur la contribution de ce radionucléide aux doses reçues par les pompiers en raison de son facteur de dose par inhalation plus élevé. Pour les Pu et ^{241}Am , les termes sources estimés à partir des rapports de concentrations moyens de ces radionucléides entre eux et par rapport au ^{137}Cs , sont respectivement de 1,5 GBq pour le ^{238}Pu et le ^{239}Pu , 2,2 GBq pour le ^{240}Pu , 59,0 GBq pour le ^{241}Pu et 21,7 GBq pour ^{241}Am . Ces valeurs sont conformes aux résultats d'autres travaux étrangers. Malgré le caractère significatif de ces termes sources, l'impact sur la santé des pompiers, qui résulterait de l'inhalation (sans port de masque de protection) d'air contaminé en ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Pu , ^{241}Am , se traduirait par une dose interne de 1,3 μSv au bout de 100 heures, soit bien inférieure à la limite autorisée pour les travailleurs habilités à intervenir dans la zone d'exclusion. Les limites actuelles imposées par la réglementation ukrainienne pour le personnel travaillant dans la zone d'exclusion sont de 3 mSv/an, se décomposant en 2,3 mSv/an pour l'exposition externe et 0,7 mSv/an pour l'exposition interne. Malgré l'importance du niveau maximal atteint en ^{137}Cs mesuré au voisinage des incendies (0,2 Bq/m³), les évaluations dosimétriques indiquent que la contribution du ^{137}Cs à la dose par inhalation reste négligeable en regard de celle due au ^{90}Sr , à ^{241}Am et aux isotopes du Pu.

(1) Ukrainian Hydrometeorological Institute.

De plus, l'essentiel de la dose (toutes voies d'exposition confondues) reste l'exposition externe par les radionucléides déposés en avril et mai 1986 dans l'environnement proche de la centrale de Tchernobyl. Cette exposition externe résulte du seul temps de présence des pompiers sur ce territoire très contaminé, et n'est pas directement liée aux incendies. Cet impact dosimétrique est du même ordre de grandeur que celui lié à la radioactivité naturelle. L'impact dosimétrique pour les habitants de Kiev ajouté par les incendies et intégrant la consommation de denrées alimentaires contaminées par dépôt atmosphérique, reste négligeable.

En avril 2020, une partie des panaches s'est propagée vers le sud et l'ouest et a vraisemblablement contribué à la détection de ^{137}Cs en suspension dans l'air jusqu'en Europe occidentale. La combinaison de feux de forêt intenses dans la région de Tchernobyl et de vents d'est est assez rare car la circulation générale des masses d'air dans l'hémisphère se fait généralement de l'ouest vers l'est. En conséquence, l'Europe occidentale est le plus souvent protégée par des intrusions de masses d'air contenant des radionucléides provenant d'incendies dans les zones contaminées autour de Tchernobyl. L'augmentation du niveau en ^{137}Cs en suspension dans l'air allait de plusieurs centaines de $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ dans le nord de l'Ukraine comme à Kiev, à quelques $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ dans d'autres pays européens. En dehors de l'Ukraine, le ^{137}Cs dans l'air était proche du niveau du bruit de fond moyen habituel et dans le haut de la plage de variabilité habituelle (au printemps, la remise en suspension par le vent des particules de sol, les pratiques agricoles et les émissions d'aérosols biogéniques, pollens et spores notamment, contribuent à augmenter la concentration du bruit de fond du ^{137}C en suspension dans l'air).

Dans le cas de la France, les niveaux de ^{137}Cs dans l'air observés sur une dizaine de stations de son réseau OPERA⁽²⁾ et situées dans la moitié est, ont été supérieurs à ceux habituellement observés et concernent dans l'ensemble la période allant du 4 au 17 avril 2020. L'activité volumique moyenne hebdomadaire la plus élevée a été mesurée à la station de Cadarache ($1,31 \pm 0,24 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) pour un prélèvement réalisé du 6 au 14 avril 2020. Cette mesure et celles de la station de Bouc-Bel-Air au sud d'Aix-en-Provence⁽³⁾ confirment les résultats des modélisations qui indiquaient que les masses entreraient en France par le sud-est. En se basant sur ses chroniques hebdomadaires du niveau en ^{137}Cs dans l'air l'IRSN a estimé la valeur moyenne

habituelle mesurée à la même période (de mars à mai) au cours des 5 dernières années sur la région. Ce niveau moyen correspond à un bruit de fond permanent en ^{137}Cs qui est en moyenne de $0,15 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ à cette saison. En retranchant ce bruit de fond et en tenant compte le plus précisément possible des dates de présence du panache⁽⁴⁾ sur notre territoire, l'IRSN estime que le niveau moyen en ^{137}Cs ajouté momentanément par les incendies en Ukraine au moment du passage du panache a été au plus de $2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Des mesures de plutonium, d' ^{241}Am et ^{90}Sr ont été réalisées à partir du regroupement de tous les filtres qui présentaient une activité volumique en ^{137}Cs supérieure au bruit de fond habituel. Aucune valeur différente du bruit de fond habituel pour ces radionucléides n'a pu être mise en évidence.

Les dépôts en ^{137}Cs consécutifs au passage de la masse d'air se sont produits en l'absence de pluie. Ce dépôt est estimé à $0,006 \text{ Bq}/\text{m}^2$. Pour mémoire, entre le 1^{er} et le 3 mai 1986, l'activité moyenne de l'air dans l'est de la France avait été de l'ordre de $1 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Cette contamination de l'air avait engendré des dépôts allant de $2\,000 \text{ Bq}/\text{m}^2$ (en l'absence de pluie), à plus de $40\,000 \text{ Bq}/\text{m}^2$ sur les zones les plus touchées (en présence de pluie). Le dépôt de ^{137}Cs associé au panache des incendies de 2020 a occasionné une exposition infime (dose efficace externe de $0,08 \text{ nSv}$) de la population française. Cette dose est de l'ordre de $100\,000$ à 1 million de fois plus faible que celle qui résulte de l'exposition au ^{137}Cs déjà présent dans les sols français suite aux essais nucléaires et à l'accident de Tchernobyl.

Suite au dépôt de ^{137}Cs au cours de cet épisode, l'IRSN a estimé sa concentration dans différentes denrées (végétaux de type légume feuille, viande et lait) de l'ordre de $2 \text{ mBq}/\text{kg}$ frais à $3 \text{ mBq}/\text{kg}$ frais.

En intégrant toutes les voies d'exposition (inhalation, ingestion de denrées marquées par les dépôts, exposition externe) et l'ensemble des radionucléides artificiels susceptibles d'avoir été transportés jusqu'en France en plus du ^{137}Cs , la dose efficace estimée est de $0,49 \text{ nSv}$ pour un adulte en supposant une consommation continue au cours de la 1^{re} année. À titre de comparaison, la dose efficace moyenne actuelle en France liée à l'incorporation de ^{137}Cs est estimée à près de $200 \text{ nSv}/\text{an}$. Pour que la dose atteigne la valeur de 1 mSv , il aurait fallu un niveau en ^{137}Cs dans l'air 2 millions de fois supérieur. Il aurait également fallu que la concentration en ^{137}Cs dans les végétaux

(2) Observatoire Permanent de la Radioactivité de l'Air. <https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/outils-scientifiques/installations-moyens-experimentaux/Opera/Pages/reseau-Opera-Air.aspx#>

(3) $1,16 \pm 0,22 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ du 4 au 10/04 et $1,16 \pm 0,13 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ du 10 au 17/04.

(4) Données issues de la modélisation réalisée par l'IRSN.

soit 30 fois plus élevée pour atteindre 0,1 Bq/kg frais et ainsi être supérieure au bruit de fond en ^{137}Cs des végétaux pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur ou encore 30 000 fois supérieure pour atteindre le Niveau Maximal Admissible dans les denrées (NMA) adopté après l'accident de Fukushima.

Pour en savoir plus

- https://www.irsn.fr/fr/actualites_presse/actualites/pages/20200505_ni-tchernobyl-ukraine-incendies-zone-exclusion-synthese-des-consequences.aspx#
- Masson O. et al. (2021) *Europe-wide atmospheric radionuclide dispersion by worst ever wildfires in the Chernobyl nuclear power plant region, April 2020. Environ. Sciences and Technol.*

6.2. REJET ACCIDENTEL DE SÉLÉNIUM-75 PAR UNE INSTALLATION BELGE EN MAI 2019

Le réacteur de recherche BR2 et ses laboratoires, situés sur le site du Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK-CEN) de Mol en Belgique (figure 3), assure la fabrication de sources de sélénium-75

pour des applications de gammagraphie industrielle. Ce radionucléide de période relativement courte⁽⁵⁾ n'existe pas à l'état naturel et n'est donc pas présent dans l'environnement.

Le 15 mai 2019, lors d'une opération de soudure d'une des sources, une capsule de ^{75}Se a été endommagée et un dégagement de fumée a été observé par l'opérateur. Immédiatement, une contamination dans la ventilation de la cellule chaude où avait lieu l'opération a été détectée. Ce dégagement dans la ventilation a entraîné un rejet de sélénium-75 par la cheminée de l'installation, évalué par l'opérateur à 37 GBq. Au vu des résultats des premières mesures et d'une évaluation de l'impact de ce rejet, l'Agence fédérale de contrôle nucléaire en Belgique (AFCN) a estimé une dose inférieure à 10 microsieverts (μSv) pour un individu qui aurait été présent à proximité du lieu du rejet et qu'aucune mesure de protection des populations ou de la chaîne alimentaire n'était nécessaire, le rejet étant ponctuel et limité en activité. Le SCK-CEN et l'AFCN ont communiqué sur cet événement sur leurs sites Internet le 16 mai 2019. L'événement a été classé au niveau 1 de l'échelle INES. Il s'agit d'une anomalie car les émissions ont dépassé les limites prescrites.

Le correspondant SCK-CEN du réseau européen Ro5⁽⁶⁾ a informé ses homologues de l'IRSN dans la matinée du 21 mai en indiquant, à partir de ses résultats de dispersion, que le rejet s'était dirigé vers la France.

FIGURE 3 / INSTALLATIONS NUCLÉAIRES DU SCK-CEN À MOL (Belgique)



(5) D'une période radioactive de 119,8 jours, le sélénium-75 est un radionucléide émetteur bêta et gamma.

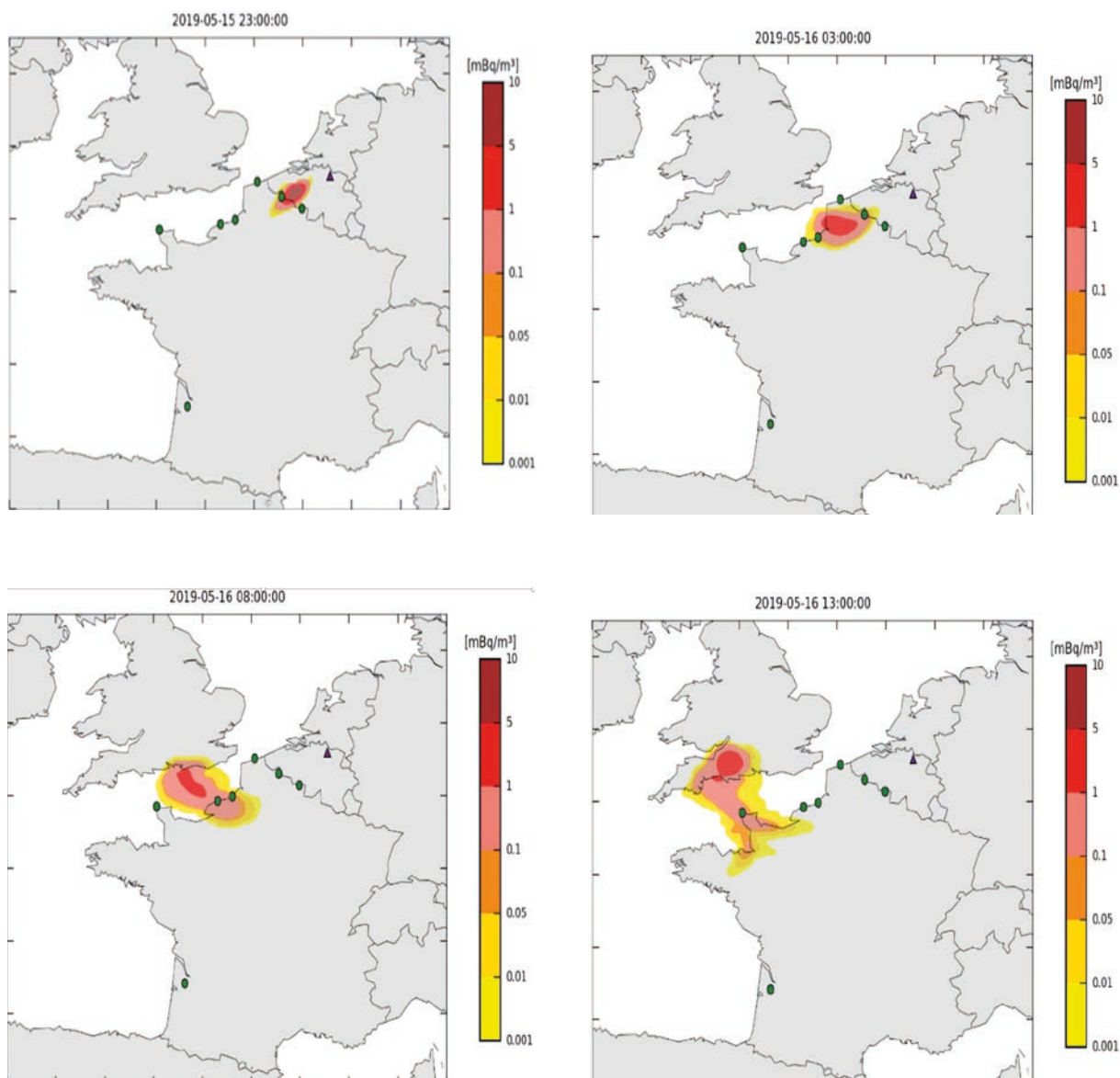
(6) Le Ring of five (Ro5) est un réseau d'experts européens sur les pollutions radioactives atmosphériques créé en 1983 par des experts de 5 pays. Aujourd'hui, ce réseau regroupe près de 90 experts d'une vingtaine de pays européens, auxquels s'ajoutent des correspondants aux USA et au Canada, qui exploitent 110 stations de prélèvement d'air et qui se sont engagés à s'alerter mutuellement en cas d'augmentation de la radioactivité de l'air et à mettre en commun les données acquises pour les expertiser.

À partir des informations reçues, l'IRSN a également réalisé une modélisation de la trajectoire du panache et une évaluation des niveaux de radioactivité attendus (figure 4).

Cette modélisation montre que la masse d'air concernée est entrée sur le territoire français par la région de Lille le 15 mai en fin de journée avec une activité en sélénium-75 dans l'air de l'ordre de 1 à

5 mBq/m³ sur une durée d'une heure. Les calculs indiquent une durée de passage du panache dans la région lilloise d'environ 3 heures. Le panache a poursuivi sa route vers la Manche par la Seine-Maritime, avant d'atteindre le nord du Cotentin le 16 mai en fin de matinée puis la façade atlantique le 17 mai, ces mouvements s'accompagnant d'une dilution progressive de l'activité en sélénium-75 dans l'air.

FIGURE 4 / MODÉLISATION DE LA TRAJECTOIRE DU PANACHE DE SÉLÉNIUM-75, LES 15 ET 16 MAI 2019 (mBq/m³)

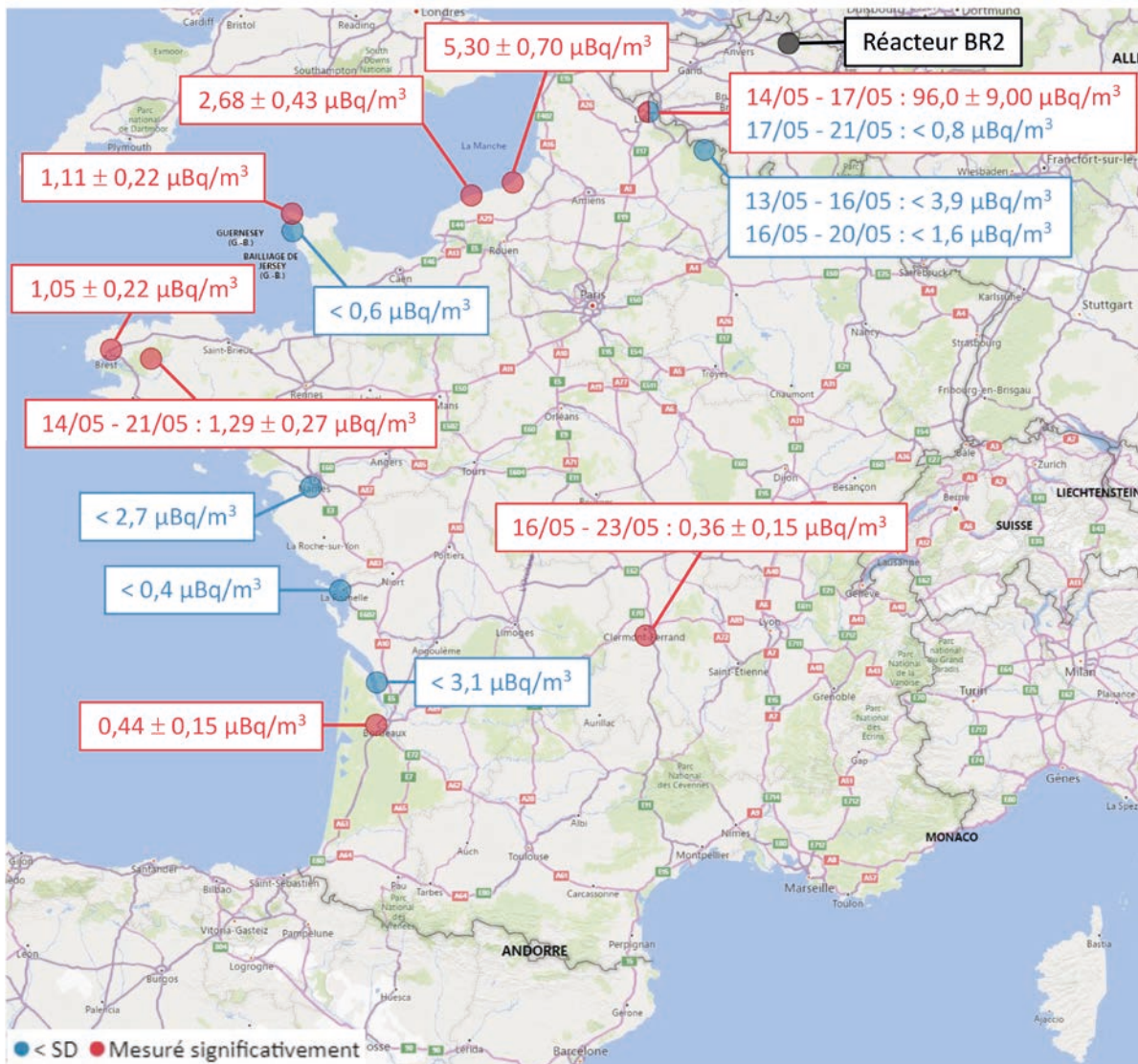


L'IRSN a par ailleurs procédé à la recherche du sélénium-75 sur les filtres de prélèvement d'aérosols provenant des stations de surveillance du réseau OPERA-Air. Les prélèvements ont duré entre 3 et 7 jours ce qui explique les différences entre les valeurs horaires prédites et les valeurs moyennes observées sur plusieurs jours. Les résultats sont présentés dans les figures 5 et 6.

Le ^{75}Se a également été détecté à Bilbao dans le nord de l'Espagne ($0,87 \pm 0,31 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

Les activités observées et leur répartition sur le territoire correspondent aux prévisions de la modélisation et ont permis de confirmer les niveaux d'activités attendus, extrêmement faibles et sans impact sanitaire pour la population.

FIGURE 5 / ACTIVITÉS EN ^{75}Se RELEVÉES SUR LES FILTRES AÉROSOLS DES STATIONS DU RÉSEAU OPERA-AIR POUR LA PÉRIODE DU 13/05/2019 AU 20/05/2019 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)



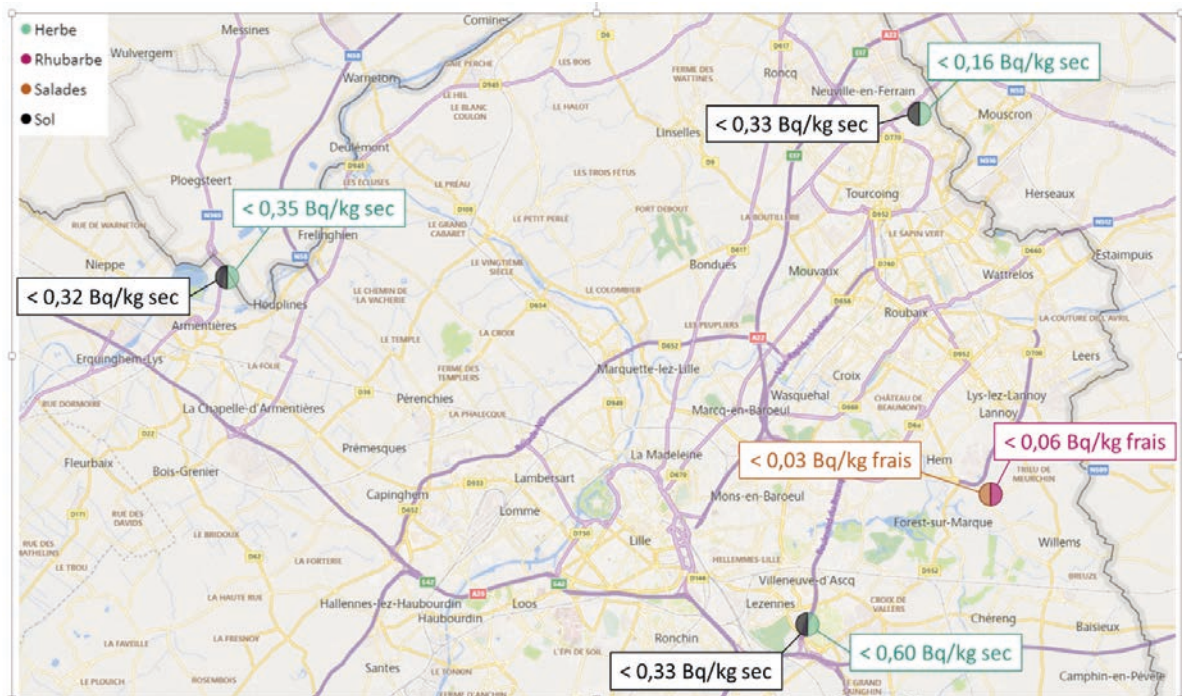
Par ailleurs, l'IRSN a mené une mission de prélèvements et de mesures dans la région de Lille le 22 mai, le lendemain de la réception de l'information du rejet par le CEN de Mol. Aucune activité en sélénium-75 supérieure aux limites de détection n'a été relevée dans les herbes, légumes et sols prélevés.

Les mesures en spectrométrie gamma *in situ* n'ont pas non plus mis en évidence la présence de sélénium-75. Ces mesures ont confirmé l'absence de risque sanitaire déduit de l'évaluation dosimétrique réalisée par l'IRSN et conduisant à des niveaux d'exposition extrêmement faibles (très inférieurs au microsievert) et n'appelant aucune mesure particulière sur le plan de la radioprotection.

Pour en savoir plus

- https://www.irsn.fr/fr/actualites_presse/actualites/pages/20190528_note-d-information-incident-installations-sck-cen-mol-belgique.aspx
- <https://afcn.fgov.be/fr/actualites/rejet-limite-de-selenium-75-au-sck-cen>
- Pieter De Meutter, Ian Hoffman. Bayesian source reconstruction of an anomalous Selenium-75 release at a nuclear research institute. *Journal of Environmental Radioactivity*, 218 (2020) 106225.
- Olivier Saunier, Joffrey Dumont le Brazidec, Damien Didier and Olivier Masson. Deterministic and Bayesian inverse modeling methods for source identification problems : Application to the selenium (⁷⁵Se) detection event in May 2019. ERPW conference, Stockholm, Sweden, october 2019.

FIGURE 6 / ACTIVITÉ DU SÉLÉNIUM-75 DANS LES PRÉLÈVEMENTS RÉALISÉS LE 22/05/2019 DANS LA RÉGION DE LILLE (Bq/kg sec)



6.3. INCENDIE SUR LE SITE DE LA HAGUE EN FÉVRIER 2020

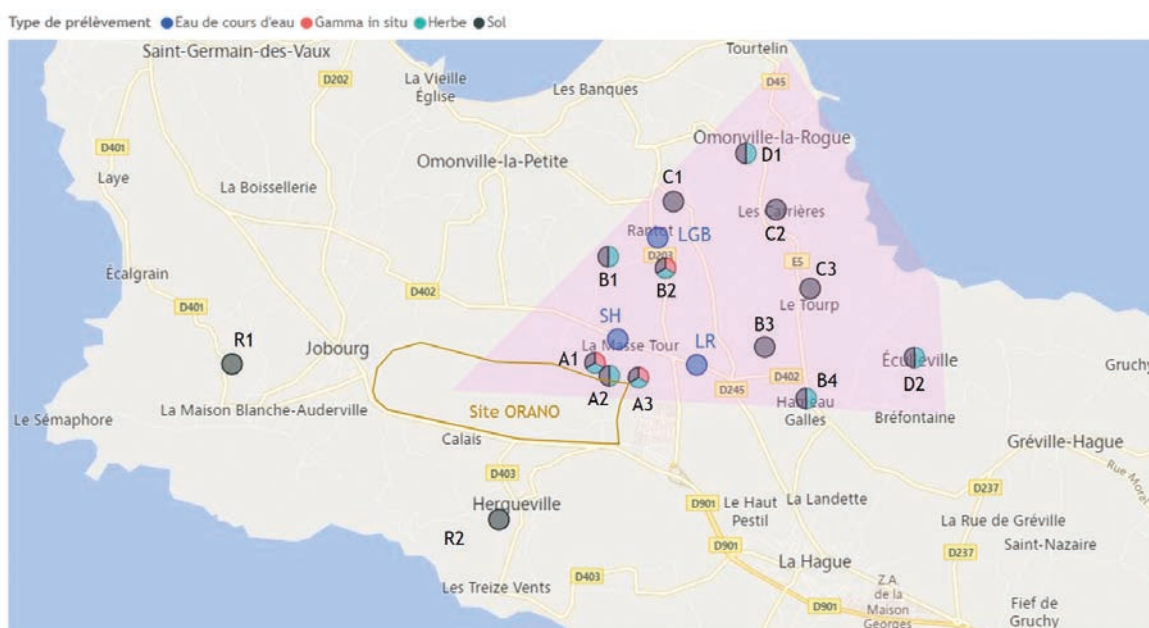
Le 16 février 2020, un incendie s'est déclaré en fin d'après-midi au niveau du bâtiment abritant la lingerie du site Orano de La Hague, entraînant un fort dégagement de fumée visible depuis l'extérieur du site. L'arrivée rapide des équipes d'intervention du site a permis, avec le renfort du service départemental d'incendie et de secours (SDIS) de la Manche, de circonscrire l'incendie qui a été maîtrisé en fin de journée. L'évènement n'a fait aucun blessé parmi le personnel et les équipes d'intervention et aucun autre bâtiment n'a été affecté.

Le local affecté était dédié, depuis la fermeture de la blanchisserie du site en 2012, à l'entreposage dans des caissons et des armoires métalliques du linge propre servant à l'approvisionnement des ateliers nucléaires et du linge usagé destiné à être expédié hors du site pour nettoyage. Malgré un risque de dispersion de matières radioactives faible compte tenu de la vocation de ce bâtiment, un suivi des conséquences de l'évènement a été mis en place par l'exploitant. Les contrôles réalisés à l'intérieur et en bordure du site à la suite de l'incendie n'ont mis en évidence aucune contamination radioactive de l'environnement.

L'IRSN n'a détecté de son côté aucune élévation anormale de la radioactivité ambiante sur ses balises de surveillance automatisée (réseau Téléray) disposées à proximité de l'établissement de La Hague. Toutefois, afin de confirmer l'absence de rejets radioactifs, les équipes de l'IRSN ont procédé le 18 février 2020, en présence de l'ASN, à des mesures directes en spectrométrie gamma *in situ* et à des prélèvements de sol, d'herbe et d'eau en bordure de la clôture du site et dans les différents hameaux et communes situés sous le vent lors de l'incendie. L'ASN avait par ailleurs mené dès le lendemain une inspection réactive portant sur le déroulement des interventions et les moyens mis en œuvre par l'exploitant pour la surveillance de l'environnement.

La figure 7 présente la stratégie d'échantillonnage mise en œuvre par l'IRSN lors de cette campagne. Au total, 8 prélèvements d'herbe et 12 prélèvements de sol ont été réalisés dans la zone sous le vent au moment de l'incendie, ainsi que deux prélèvements de sol au sud du site, considérés comme non influencés par les éventuelles conséquences de l'incendie et retenus comme références. Les principaux cours d'eau situés dans la zone (les Roteures, la Sainte-Hélène et le Grand Bel) ont également fait l'objet de prélèvements. L'ensemble des échantillons a été mesuré dans les laboratoires de l'IRSN.

FIGURE 7 / REPRÉSENTATION DE LA ZONE SOUS LE VENT AU MOMENT DE L'INCENDIE ET DES MESURES *IN SITU* ET PRÉLÈVEMENTS RÉALISÉS PAR L'IRSN LE 18 FÉVRIER 2020



À noter qu'en complément des deux échantillons de référence réalisés au sud du site, la zone située au nord-est de l'établissement de La Hague avait fait l'objet d'une campagne de prélèvements en juillet 2018 visant à mettre à jour les niveaux d'activités pour les principaux radionucléides artificiels présents dans la zone. Les résultats acquis lors de cette campagne ont donc pu être comparés aux niveaux mesurés juste après l'incendie aux mêmes points.

Les premiers résultats de mesures *in situ* obtenus n'ont fait apparaître aucune anomalie. Seul le césium-137 a été mesuré à des niveaux équivalents au bruit de fond mesuré dans l'environnement du site, et aucun autre radionucléide artificiel n'a été détecté au-dessus des seuils de décision, confirmant ainsi les premiers résultats de mesures obtenus pas l'exploitant (figure 8).

Sur les différents échantillons prélevés dans la zone située sous les vents lors de l'incendie, les seuls radionucléides artificiels pour lesquels les mesures en spectrométrie gamma des échantillons présentent des valeurs significatives (supérieures aux seuils de décision) sont :

- le césium-137, dans l'ensemble des échantillons de sol et dans quatre échantillons d'herbe (figure 9). Les activités des sols se situent dans les gammes

des valeurs usuellement observées dans l'ouest de la France (3 à 6 Bq/kg frais). Les mesures d'herbe sont quant à elles comparables à celles relevées par l'IRSN lors de précédentes missions autour du site et dans le cadre de la surveillance radiologique régulière de celui-ci (de 0,1 à quelques Bq/kg sec) ;

- l'iode-129, principalement dans les échantillons d'herbe, à des niveaux proches de ceux mesurés usuellement à proximité du site de la Hague du fait des activités de retraitement d'Orano (compris entre 0,8 et 3,3 Bq/kg sec) ;
- le cobalt-60 dans un échantillon de sol prélevé au point C3 (figure 7), à un niveau proche du seuil de décision ($0,30 \pm 0,09$ Bq/kg sec). Ce radionucléide, présent dans les rejets du site, n'avait pas été mis en évidence lors des campagnes de caractérisation hormis dans la zone située au nord-ouest du site, potentiellement affectée par des événements historiques dont l'incendie du silo 130 en 1981.

Aucune valeur significative pour les radionucléides artificiels n'a par ailleurs été relevée en spectrométrie gamma sur les échantillons d'eau prélevés sur la Sainte-Hélène, le Grand Bel et les Roteures.

FIGURE 8 / ACTIVITÉ EN CÉSIMUM-137 MESURÉE PAR SPECTROMÉTRIE GAMMA *IN SITU* (Bq/kg)



À titre de comparaison, lors de la précédente campagne menée dans cette zone en juillet 2018, les points A1, A2 et A3 avaient fait l'objet de prélèvements de sol et d'herbe. Les activités en césium-137 sont données

dans le tableau 1 et confirment qu'aucune élévation de la radioactivité artificielle n'a été mise en évidence dans ce secteur en lien avec l'évènement.

FIGURE 9 / ACTIVITÉ EN CÉSIUM-137 MESURÉE PAR SPECTROMÉTRIE GAMMA

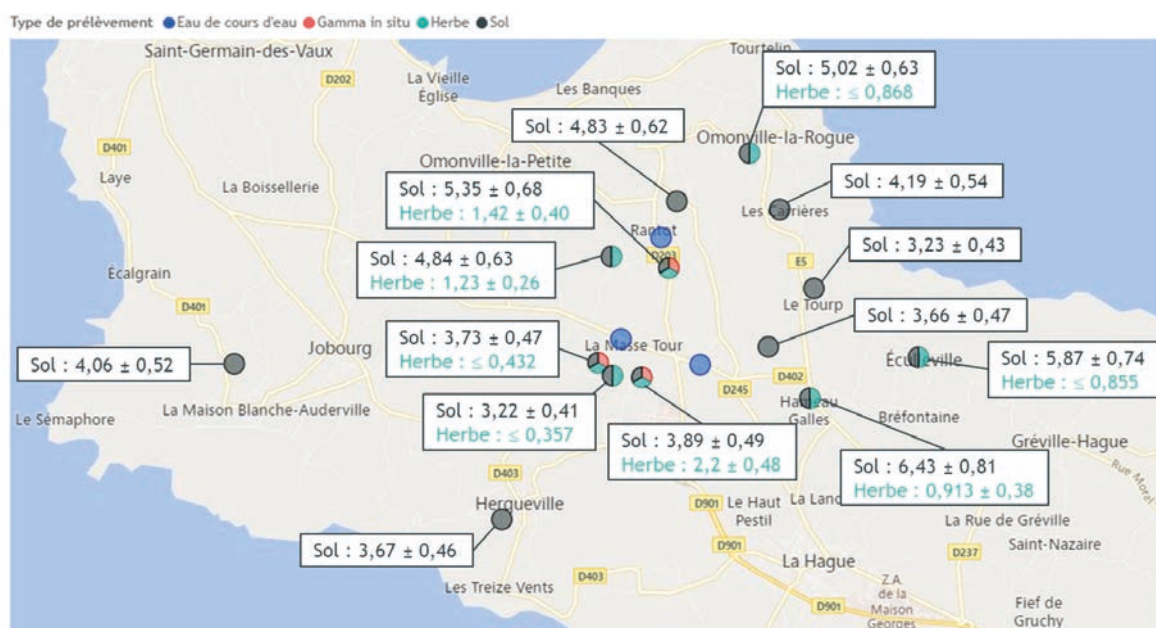


TABLEAU 1 / ACTIVITÉ COMPARÉE EN CÉSIUM-137 ENTRE JUILLET 2018 ET FÉVRIER 2020
SUIVE À L'INCENDIE DE LA PLATEFORME LINGE DU SITE ORANO

Point	Matrice	Campagne de caractérisation de site 24/07/2018	Campagne de prélèvements du 18/02/2020
A1	Sol	4,14 ± 0,53 Bq/kg frais	3,73 ± 0,47 Bq/kg frais
	Herbe	≤ 1,2 Bq/kg sec	≤ 0,432 Bq/kg sec
A2	Sol	5,94 ± 0,77 Bq/kg frais	3,22 ± 0,41 Bq/kg frais
	Herbe	≤ 0,7 Bq/kg sec	≤ 0,357 Bq/kg sec
A3	Sol	7,53 ± 0,97 Bq/kg frais	3,89 ± 0,49 Bq/kg frais
	Herbe	≤ 1,5 Bq/kg sec	2,2 ± 0,48 Bq/kg sec

Compte tenu des activités du site, et afin d'exclure un éventuel marquage avec des radionucléides émetteurs alpha, les échantillons de sols prélevés à proximité de la bordure du site aux points A1, A2, A3 et B2 (figure 7) ont également fait l'objet d'une mesure des isotopes du plutonium (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$) et de l'américium-241 (tableau 2). Les activités mesurées sont très faibles et ne font pas apparaître de marquage particulier : elles sont cohérentes avec les niveaux rencontrés dans l'environnement du site de La Hague et du même ordre de grandeur que les activités mesurées dans les sols lors de la campagne de 2018.

En conclusion, aucune élévation anormale de la radioactivité n'a été détectée lors des investigations menées par l'IRSN suite à l'incendie de la lingerie du site Orano, et aucun marquage de l'environnement du site imputable à cet événement n'a été mis en évidence.

TABLEAU 2 / ACTIVITÉS EN PLUTONIUM ET AMÉRICIUM MESURÉES SUR LES SOLS PRÉLEVÉS AUX POINTS A1, A2, A3 ET B2

Point de prélèvement	^{238}Pu (Bq/kg sec)	$^{239+240}\text{Pu}$ (Bq/kg sec)	^{241}Am (Bq/kg sec)
A1	< 0,031	0,26 ± 0,09	0,12 ± 0,07
A2	< 0,027	0,17 ± 0,1	< 0,06
A3	< 0,05	0,27 ± 0,15	0,11 ± 0,08
B2	< 0,05	0,27 ± 0,11	0,06 ± 0,06



Mesure par spectrométrie gamma *in situ* réalisée par l'IRSN à proximité du site de La Hague suite à l'incendie de février 2020.

© IRSN

6.4. INCENDIE DANS LE SOUS-MARIN « PERLE » À TOULON EN JUIN 2020

Le 12 juin 2020 à 10 h 30, un incendie s'est déclaré à bord du sous-marin nucléaire d'attaque (SNA) Perle, en cale sèche dans la base navale de Toulon. Ce dernier était en travaux depuis janvier 2020 et ne contenait de ce fait aucun combustible nucléaire à bord. Dès qu'il a été alerté, l'IRSN a mobilisé son organisation de crise afin, notamment, de vérifier par la mesure l'absence de rejet. La stratégie mise en œuvre s'est articulée en trois points :

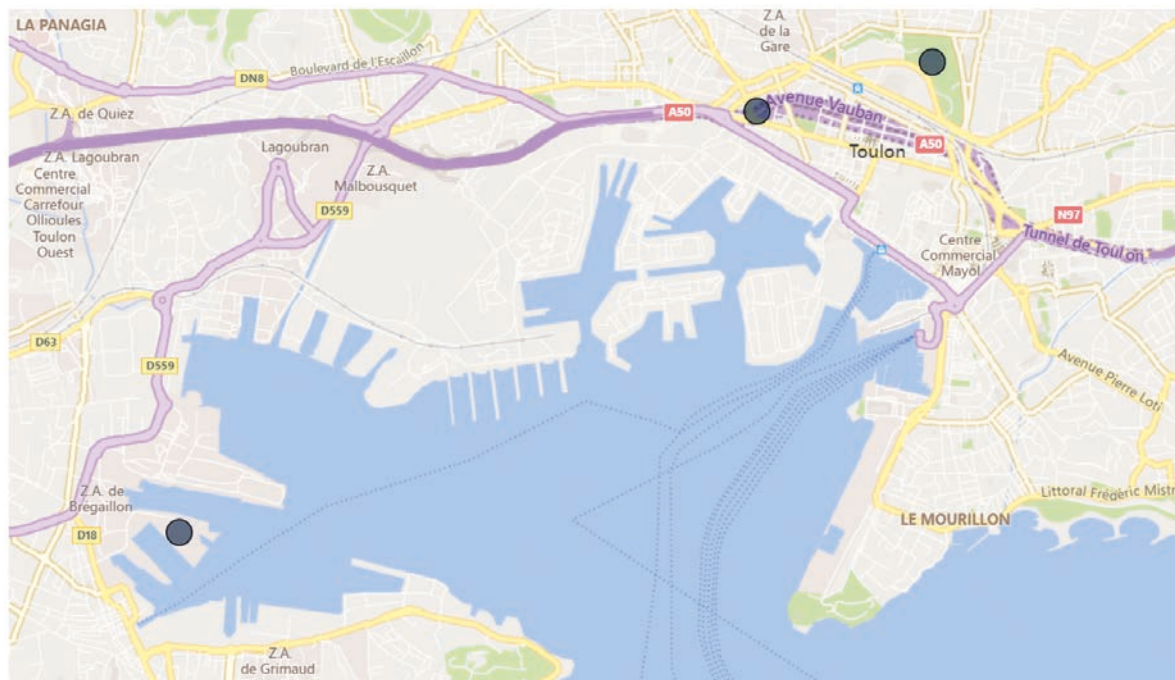
- analyse immédiate des mesures du réseau de surveillance de l'IRSN ;
- campagne réactive de mesures *in situ* réalisées le 12 juin après-midi et le 13 juin matin par les équipes de l'IRSN envoyées sur place ;

- mesures réactives des prélèvements réalisés à Toulon aux abords de la base navale les 12 et 13 juin dans un véhicule laboratoire « environnement » et mesures différées dans les laboratoires fixes de l'IRSN.

Mesures du réseau de surveillance de l'IRSN

Durant tout l'évènement, les niveaux de rayonnement gamma ambiant ont été mesurés par les trois balises du réseau Téléray de l'IRSN⁽⁷⁾ implantées à Toulon et à La Seyne-sur-Mer. Ces trois balises situées à proximité du port militaire (figure 10) n'ont montré aucune anomalie radiologique liée à cet incendie.

FIGURE 10 / LOCALISATION DES BALISES TÉLÉRAY IMPLANTÉES À PROXIMITÉ DE LA BASE NAVALE DE TOULON



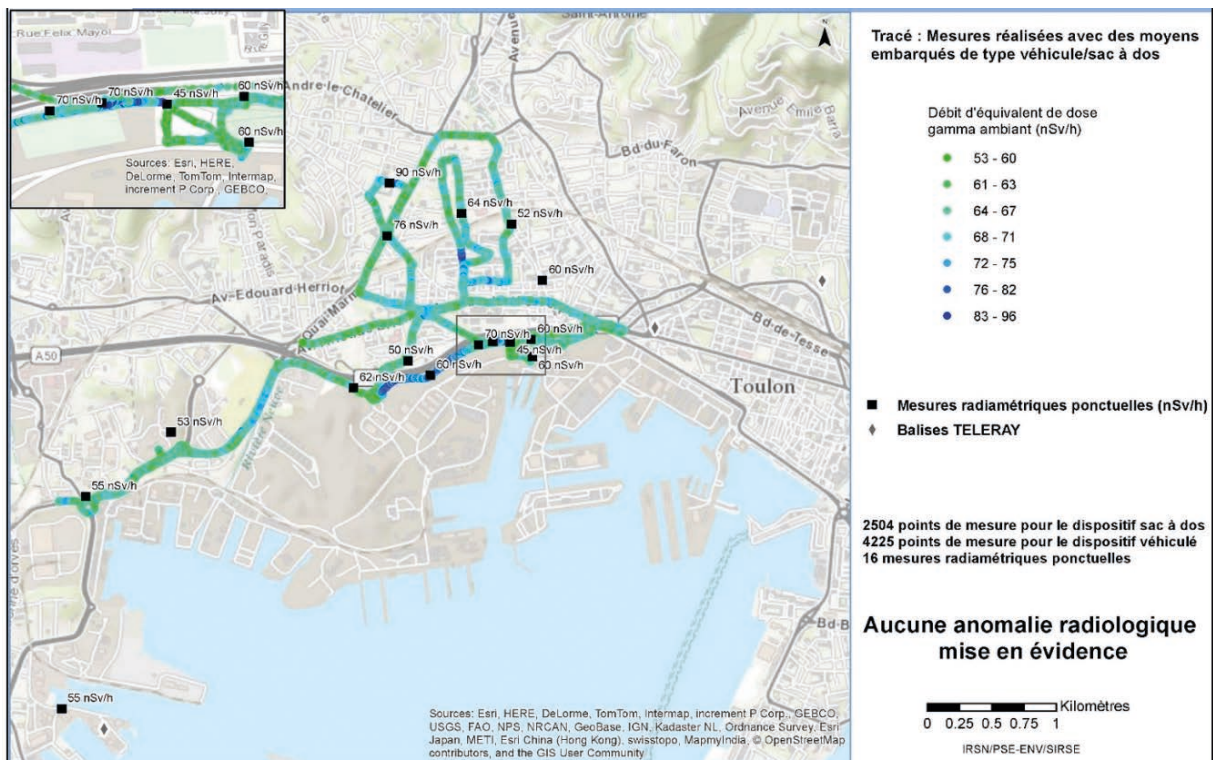
(7) Le réseau d'alerte radiologique Téléray de l'IRSN est constitué de plus de 440 balises réparties sur le territoire qui mesurent en temps réel le rayonnement gamma ambiant, permettant ainsi d'en déceler toute augmentation anormale (données accessibles sur le site <http://telaray.irsn.fr>).

Campagne réactive de mesures *in situ*

Dès le 12 juin au soir, des mesures complémentaires du débit d'équivalent de dose gamma ambiant ont été réalisées à proximité du port militaire par la Cellule Mobile de l'IRSN au moyen de dispositifs de détection embarqués dans un véhicule (cartographie

d'axes routiers) et dans un sac à dos (cartographie de voie pédestre). Plus de 6 700 mesures ont été ainsi enregistrées par ces dispositifs. Les débits de dose gamma ambiant mesurés, tous compris entre 50 et 100 nSv/h, correspondaient à la fluctuation usuelle du rayonnement naturel en milieu urbain⁽⁸⁾ et n'ont révélé aucune anomalie radiologique.

FIGURE 11 / CARTOGRAPHIE DU DÉBIT D'ÉQUIVALENT DE DOSE GAMMA AMBIANT AUX ABORDS DE LA BASE NAVALE DE TOULON DU 12/06/2020 AU 13/06/2020 (nGy/h)



(8) En milieu bâti, le rayonnement gamma ambiant fluctue en fonction de la radioactivité naturelle contenue dans les matériaux de construction et avec la configuration des rues (largeur et hauteur des bâtiments).

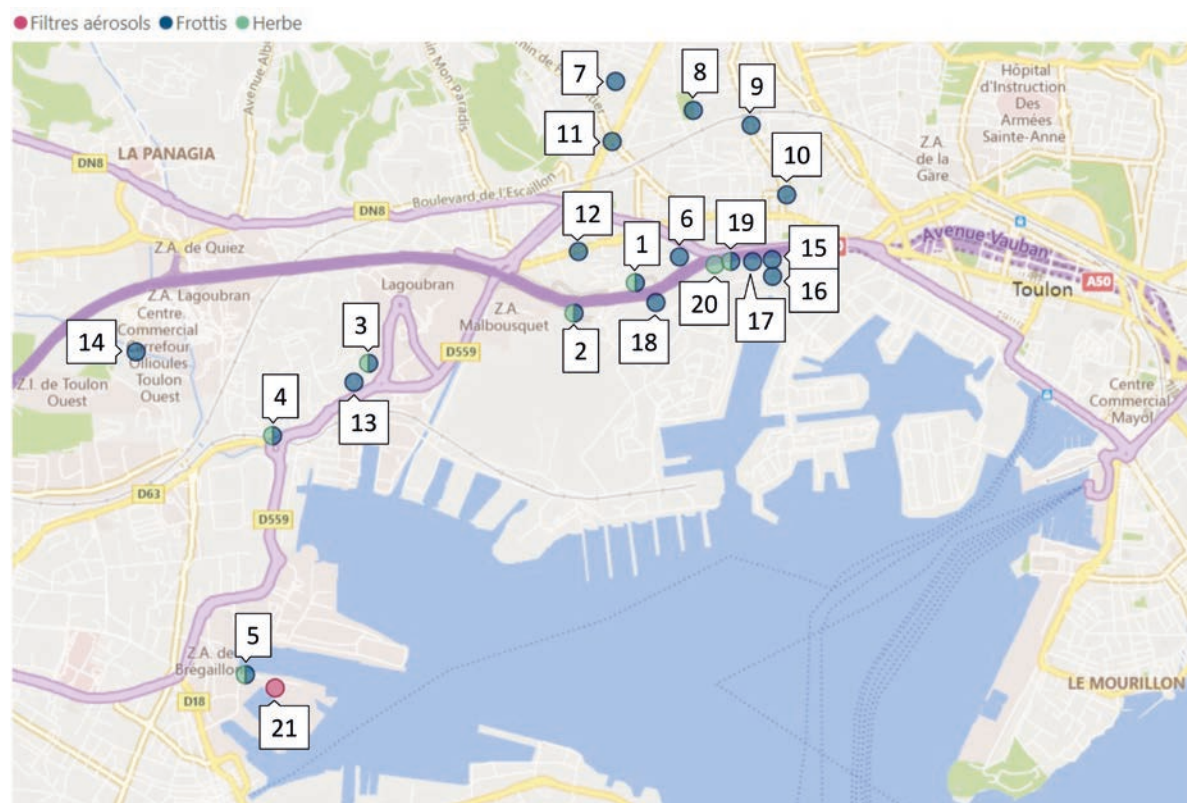
Mesures réactives dans le véhicule laboratoire « environnement » et mesures différées dans les laboratoires fixes de l'IRSN

Afin de confirmer l'absence de tout dépôt radioactif qui aurait pu se constituer à la suite d'une contamination de l'air liée à l'incendie, les personnels de l'IRSN et du Service Départemental d'Incendie et de Secours mobilisés ont effectué, le 13 juin matin, des frottis surfaciques⁽⁹⁾ et des prélèvements de végétaux aux abords de la base navale et dans la ville de Toulon, soit au total une vingtaine de points de contrôle, principalement dans la zone située sous les vents pendant l'incendie.

Les résultats des analyses des frottis, disponibles le jour même, n'ont mis en évidence aucune contamination radiologique surfacique de l'environnement extérieur de la base navale de Toulon. Toutes les mesures obtenues étaient inférieures aux seuils de décision (SD), respectivement de 0,02 Bq/cm² pour les radionucléides émetteurs alpha et 0,04 Bq/cm² pour les radionucléides émetteurs bêta/gamma avec le protocole de mesures mis en œuvre.

Les prélèvements de végétaux (herbes), effectués en 7 points situés dans la zone sous les vents pendant l'incendie, ont fait l'objet d'une première analyse le jour même au moyen des dispositifs de mesure d'urgence disponibles dans le Véhicule Laboratoire Environnement de l'IRSN mobilisé. Ils ont ensuite été acheminés pour des analyses plus poussées dans les

FIGURE 12 / LOCALISATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT RÉALISÉS LE 13 JUIN 2020 AUX ABORDS DE LA BASE NAVALE DE TOULON



(9) Les frottis sont réalisés sur différentes surfaces de matériel urbain (abribus, poubelles publiques, panneaux de signalisation, poteaux métalliques d'éclairage...) au niveau des points de contrôle définis par l'IRSN.

laboratoires de l'Institut à Cadarache. Ces mesures, qui nécessitent plusieurs jours, permettent de détecter des traces infimes de radioactivité. Outre la présence de radionucléides d'origine naturelle, trois échantillons ont présenté des activités très faibles en césium-137 à des niveaux correspondant au bruit de fond en France induit par la rémanence de l'accident de Tchernobyl, et similaires à ceux mesurés habituellement par l'IRSN dans le cadre de sa surveillance régulière (tableau 3). Aucune autre trace de radionucléide artificiel imputable à l'incendie du sous-marin n'a été détectée.

L'IRSN dispose également à La Seyne-sur-Mer, sur le site de l'IFREMER, d'une station de prélèvement d'aérosols atmosphériques du réseau OPERA-AIR

très puissante⁽¹⁰⁾. Cette station, arrêtée depuis mi-mars 2020 en raison du confinement lié à l'épidémie de Covid-19, a été réactivée en urgence le 12 juin à 17 h. Le filtre, récupéré le 15 juin et analysé par le laboratoire de l'IRSN d'Orsay, avec les moyens les plus performants disponibles à l'Institut, n'a pas mis en évidence d'élévation anormale de la radioactivité dans l'air pour la période allant du 12 juin à 17 h à 15 juin 13 h (tableau 4).

En conclusion, l'ensemble des mesures réalisées par l'IRSN à la suite de l'incendie du sous-marin Perle, n'a mis en évidence aucune anomalie radiologique dans l'environnement proche de la Base Navale de Toulon liée à cet événement.

TABLEAU 3 / RÉSULTATS DES ANALYSES DES PRÉLÈVEMENTS D'HERBE RÉALISÉS LE 13 JUIN 2020 AUX ABORDS DE LA BASE NAVALE DE TOULON

Points de prélèvement	Date et heure de prélèvement	Activité (Bq/kg frais)				
		⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	^{110m} Ag	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
1	13/06/20 à 9 h 30	< 0,097	< 0,115	< 0,100	< 0,089	< 0,106
2	13/06/20 à 10 h 10	< 0,060	< 0,073	< 0,065	< 0,055	0,156 ± 0,083
3	13/06/20 à 10 h 20	< 0,059	< 0,069	< 0,059	< 0,048	< 0,063
4	13/06/20 à 10 h 40	< 0,103	< 0,127	< 0,090	< 0,096	0,209 ± 0,126
5	13/06/20 à 11 h 30	< 0,117	< 0,130	< 0,117	< 0,107	< 0,123
19	13/06/20 à 10 h 35	< 0,052	< 0,058	< 0,063	< 0,051	< 0,057
20	13/06/20 à 10 h 30	< 0,069	< 0,079	< 0,067	< 0,064	0,080 ± 0,077

TABLEAU 4 / RÉSULTATS DES ANALYSES DU FILTRE AÉROSOL DE LA STATION OPERA-AIR DE L'IRSN SITUÉE À LA SEYNE-SUR-MER

Point de prélèvement	Date et heure de prélèvement	Activité (µBq/m ³)				
		⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	^{110m} Ag	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
21	12/06/20 17 h 00 au 15/06/20 13 h 00	< 0,039	< 0,047	< 0,071	< 0,044	0,071 ± 0,033

(10) Le réseau OPERA-AIR de l'IRSN est constitué de 49 stations de prélèvement sur filtres d'aérosols atmosphériques réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain et en Polynésie, qui fonctionnent de manière continue. Avec un débit d'aspiration de 700 m³/h, la station installée à La Seyne-sur-Mer fait partie des 11 stations « très grand débit » de ce réseau.

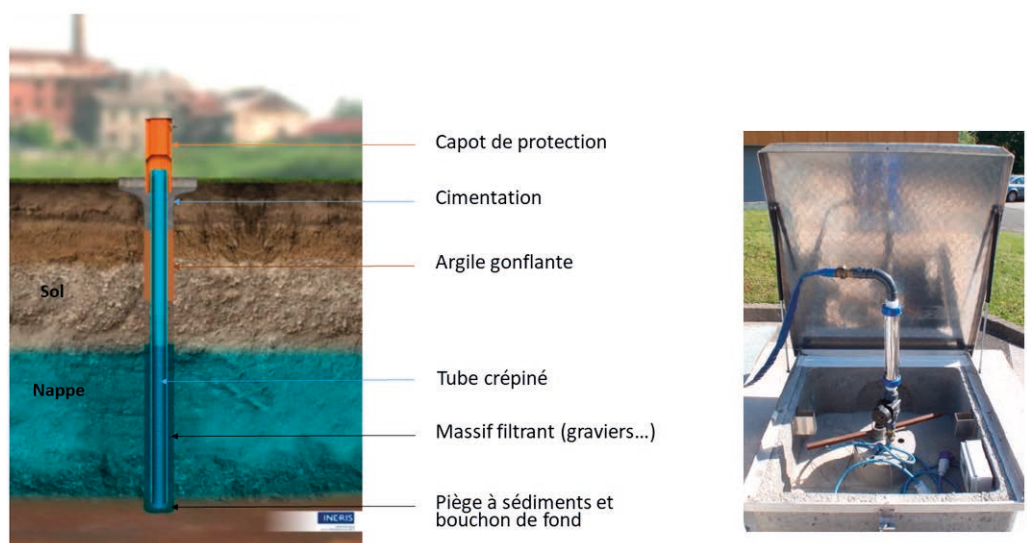
6.5. ÉTUDE SUR LE TRITIUM DANS LES NAPPES PHRÉATIQUES

Les niveaux de radioactivité mesurés dans les nappes d'eau souterraines sont le reflet non seulement des radionucléides naturellement présents dans l'écorce terrestre, comme le potassium-40 et les produits des chaînes de désintégration de l'uranium-238, de l'uranium-235 et du thorium-232, mais également des activités humaines. Le tritium, élément produit naturellement dans l'atmosphère et également rejeté par les installations nucléaires, a aussi été introduit en grande quantité dans l'atmosphère par les essais atmosphériques d'armes nucléaires aériens ; il a atteint les eaux souterraines principalement par infiltration des eaux de pluies, à l'exception des nappes d'eaux souterraines situées à grande profondeur. À titre de comparaison, le bruit de fond du tritium de la plupart des eaux de source en France est de l'ordre de 1 Bq/L, soit du même ordre que l'activité en tritium mesurée dans l'eau de pluie hors influence des installations nucléaires, alors que l'eau des Abatilles, prélevée à plus de 400 m de profondeur, a une activité du tritium inférieure à 0,04 Bq/L.

Les nappes d'eaux souterraines situées à l'aplomb des sites nucléaires constituent l'un des milieux les plus surveillés par les exploitants nucléaires afin de s'assurer, comme le prévoit la réglementation, de l'absence de pollution chimique ou radiologique des eaux souterraines par leurs activités. Pour le volet radiologique, le tritium, par sa nature extrêmement mobile et sa forte capacité d'échange, est l'un des radionucléides les plus mobiles et les plus complexes à confiner. En se substituant à l'hydrogène non radioactif présent dans les molécules d'eau, il sera le premier radionucléide à atteindre la nappe phréatique, et constitue donc un excellent indicateur de l'impact sur l'environnement des événements pouvant survenir sur les installations, en particulier ceux impliquant des effluents liquides.

La surveillance de ce milieu repose en particulier sur des prélèvements d'eau réalisés à l'aide de piézomètres, à une fréquence variable, de quotidienne à annuelle. Pour le volet radiologique, les paramètres généralement mesurés sont les activités alpha et bêta globales et le tritium. En fonction de la structure hydrogéologique du sous-sol et des sites, le réseau de piézomètres peut être plus ou moins dense, allant par exemple pour la surveillance réglementaire des CNPE EDF de 5 piézomètres sur un site comme Blayais à 74 à Cruas-Meysses.

FIGURE 13 / COUPE SCHÉMATIQUE D'UN PIÉZOMÈTRE

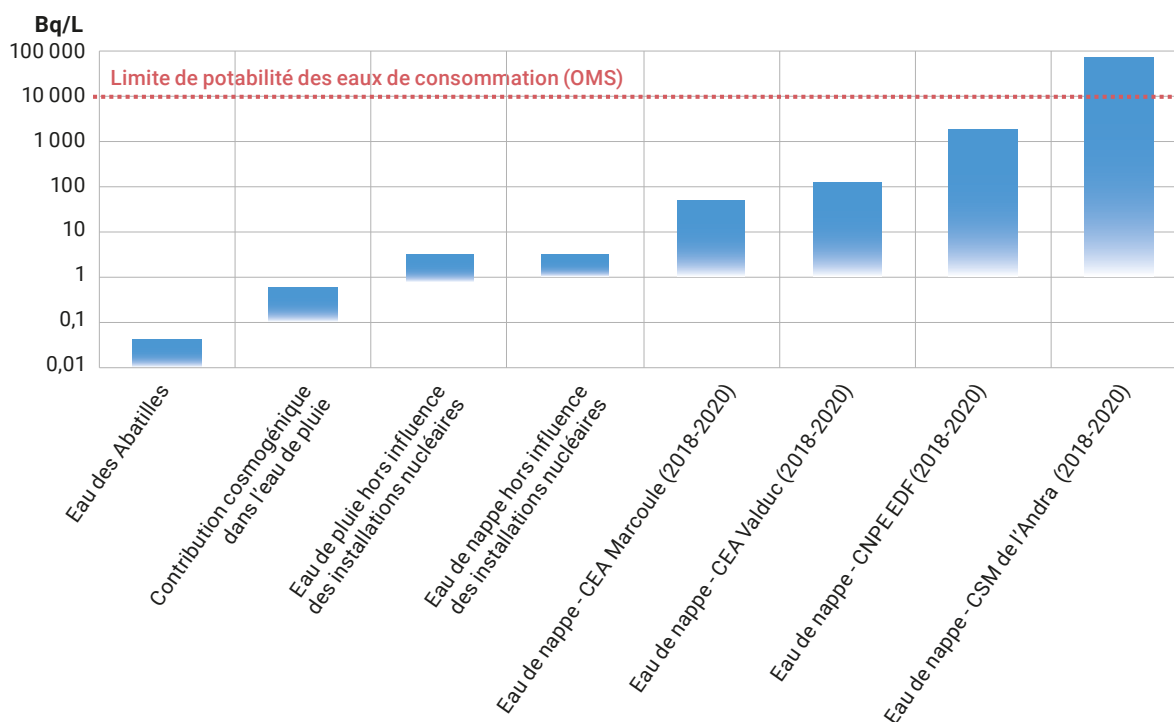


Plusieurs processus peuvent entraîner la migration de radionucléides dans les nappes d'eaux souterraines sous les installations :

- la recharge naturelle de la nappe par les eaux de pluie contenant des radionucléides ou par les eaux de cours d'eau avec lesquels elle communique ;
- l'entraînement de radionucléides présents dans le sol ou en surface par percolation d'eau ;
- l'infiltration d'effluents ou plus généralement de liquides utilisés dans les procédés mis en œuvre sur le site à la suite d'un déversement incidentel ;
- la diffusion, notamment par des eaux d'infiltration, de radionucléides contenus dans des déchets radioactifs déposés en surface ou enfouis dans le sol, sous une forme ou dans des conditions qui ne permettraient pas d'assurer leur confinement total ;
- le ruissellement le long des piézomètres (ouvrages cimentés et/ou tube) installés sur le site pour assurer la surveillance de la nappe.

Le marquage en tritium le plus élevé observé actuellement en France dans les eaux souterraines se situe au niveau du centre de stockage de la Manche de l'Andra, avec des activités pouvant dépasser 70 000 Bq/L. Cette pollution historique est liée à une inétanchéité de déchets tritiés entreposés dans la première moitié des années 1970 et détectée en 1978. Malgré la reprise de ces déchets dès cette date et leur reconditionnement, ce marquage reste aujourd'hui visible et demeure très important. Les autres activités volumiques pouvant être observées dans le RNM pour cette matrice sont inférieures de plusieurs ordres de grandeur, et ce quels que soient le site et l'exploitant considérés.

FIGURE 14 / ORDRES DE GRANDEUR DES ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS LES EAUX DE PLUIE ET LES EAUX SOUTERRAINES (Bq/L) ; VOIR AUSSI LA FIGURE 19 POUR LES EAUX DE NAPPES



D'autres marquages liés à l'historique de l'exploitation des sites nucléaires peuvent encore être observés aujourd'hui, comme au niveau de l'ancien puits (captage) de Codolet au sud du site de Marcoule, en tritium et strontium-90. La détection des marquages induits par les activités industrielles en ce point s'explique en particulier par le sens général d'écoulement de la nappe située à l'aplomb du CEA Marcoule, orienté vers le sud en direction de Codolet. Par ailleurs, le sous-sol, par sa composition de sables et graviers alluviaux, est très perméable et permet donc une grande mobilité des radionucléides.

Après des activités en tritium relevées au niveau du puits comprises entre 600 et 1 000 Bq/L au début des années 1970, on note une diminution d'un ordre de grandeur tous les 20 ans, avec un niveau aujourd'hui proche du bruit de fond, montrant ainsi l'absence de nouvel apport de ce radionucléide au niveau de la nappe depuis plusieurs années (figure 15).

Les valeurs en strontium-90, inférieures à 0,006 Bq/L jusqu'en 1978, sont aujourd'hui de l'ordre de 0,07 Bq/L, après une augmentation très importante durant la période 1980-1992 (figure 16). Ce phénomène d'alimentation de la nappe en strontium-90, du fait d'événements anciens en lien avec les effluents liquides générés par les activités de retraitement, a été fortement résorbé grâce à des travaux réalisés dans la seconde moitié des années 1980 (pompages réalisés dans la nappe et mise en place d'une paroi d'isolement), permettant d'endiguer l'apport dans la nappe. Grâce à ces dispositions, la concentration en strontium-90 a été divisée par 50 entre 1993 et 2013.

FIGURE 15 / TRITIUM DANS L'EAU PRÉLEVÉE AU NIVEAU DE L'ANCIEN PUIT À CODELET AU SUD DU CEA MARCOULE (Bq/L)

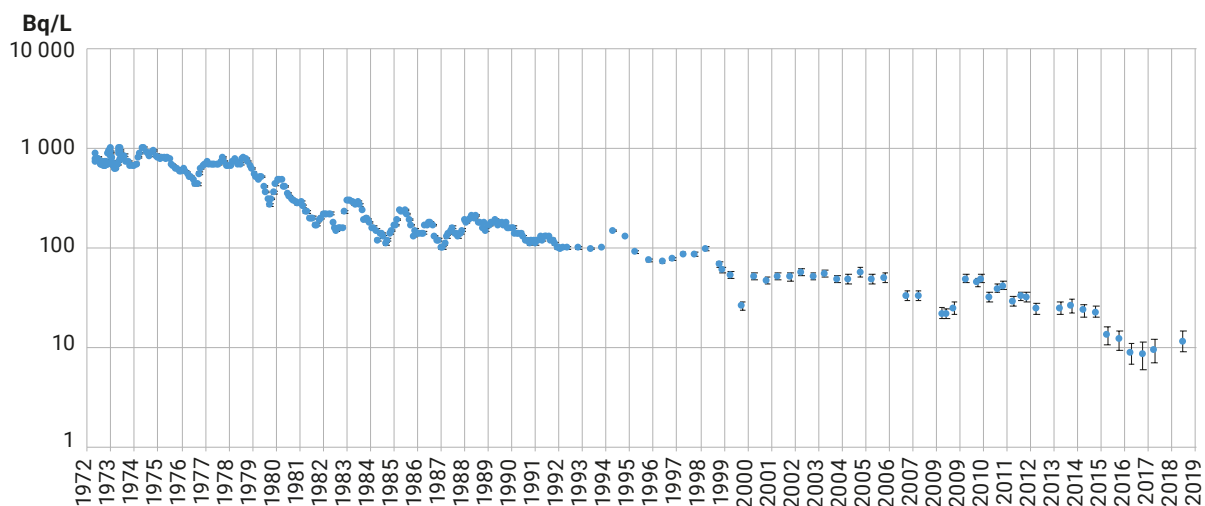
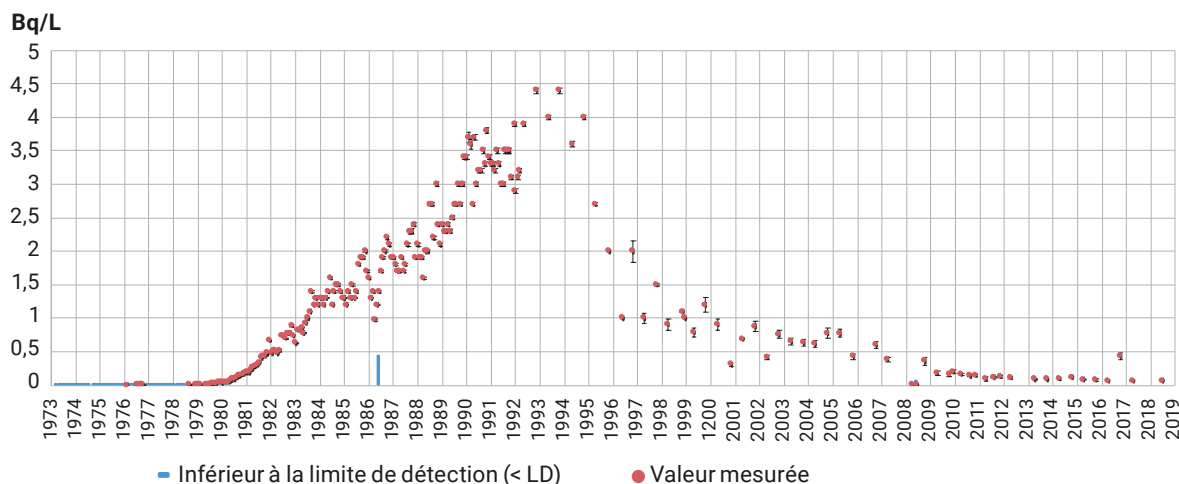


FIGURE 16 / STRONTIUM-90 DANS L'EAU PRÉLEVÉE AU NIVEAU DE L'ANCIEN PUIS À CODELET AU SUD DU CEA MARCOULE (Bq/L)



Il convient cependant de noter que les marquages observés restent rarement constants et sont mobiles : en effet, du fait de la dynamique des nappes phréatiques (battements saisonniers, transferts vers d'autres nappes ou des cours d'eau...), de la diffusion éventuelle des radionucléides dans le milieu ou plus simplement de leur décroissance radioactive (le tritium a par exemple une période radioactive de 12,3 ans), les activités de l'eau prélevée en un piézomètre donné varient au cours du temps, parfois de façon importante. On peut ainsi constater, en un même point de prélèvement, une augmentation (apport de radioactivité), une diminution progressive (diffusion et/ou déplacement) puis à nouveau une augmentation, liée au marquage initial du fait des mouvements de la nappe ou d'un apport d'eau (pluviométrie). La figure 17 illustre ce phénomène, observé suite à un marquage détecté fin octobre 2019 par le CNPE du Tricastin, où l'on peut observer, pendant un an après une première diminution des activités mesurées, des oscillations de plus de 200 Bq/L des activités de tritium dans l'eau prélevée dans le même piézomètre.

Sur la période 2018-2020, hormis les mesures d'indices alpha et bêta globales, la quasi-totalité des résultats supérieurs aux seuils de décision obtenus par les exploitants lors de la mesure des eaux souterraines à l'aplomb des sites nucléaires concerne le tritium. Les niveaux supérieurs au bruit de fond observés peuvent correspondre soit à une alimentation de la nappe par des eaux de surface sous influence d'un site nucléaire (les niveaux restant faibles dans ce cas), soit à des marquages anciens, soit à des événements survenus sur cette période. Plusieurs sites ont ainsi connu une augmentation significative des activités de tritium dans les eaux prélevées au niveau d'un ou plusieurs piézomètres, avec le plus souvent un retour rapide des activités mesurées aux niveaux antérieurs à l'événement, dès lors que la cause de l'apport en tritium avait été éliminée, comme ce fut par exemple le cas sur le CNPE de Cruas-Meysses, suite au débordement d'un puisard dans un regard non étanche en avril 2018 (figure 18).

FIGURE 17 / ACTIVITÉ DU TRITIUM DANS L'EAU PRÉLEVÉE AU NIVEAU DU PIÉZOMÈTRE OSEZ042PZ SUR LE CNPE DU TRICASTIN (Bq/L)

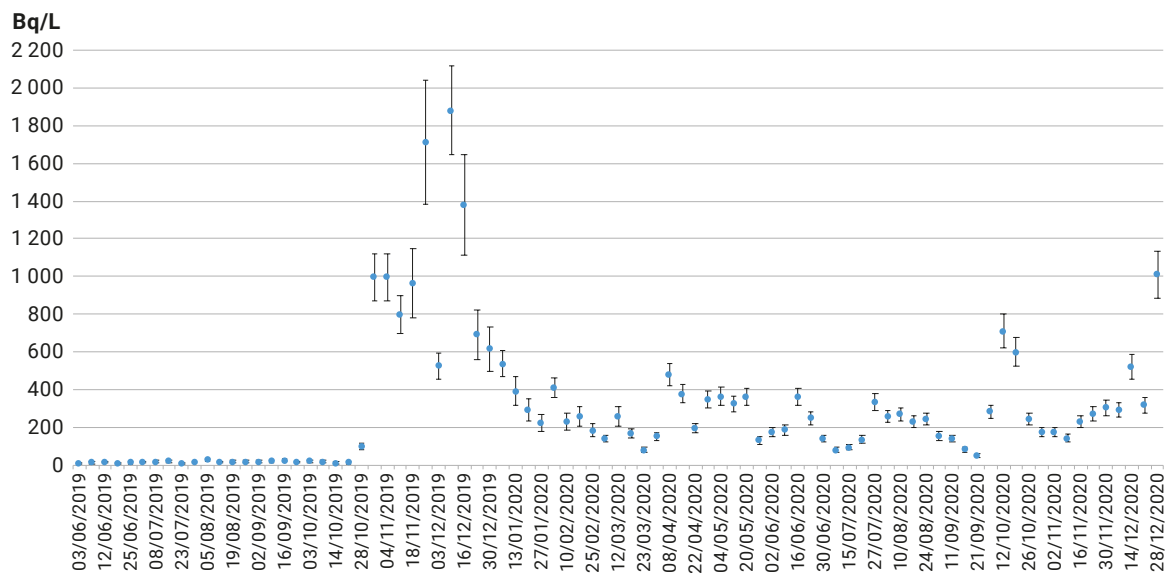
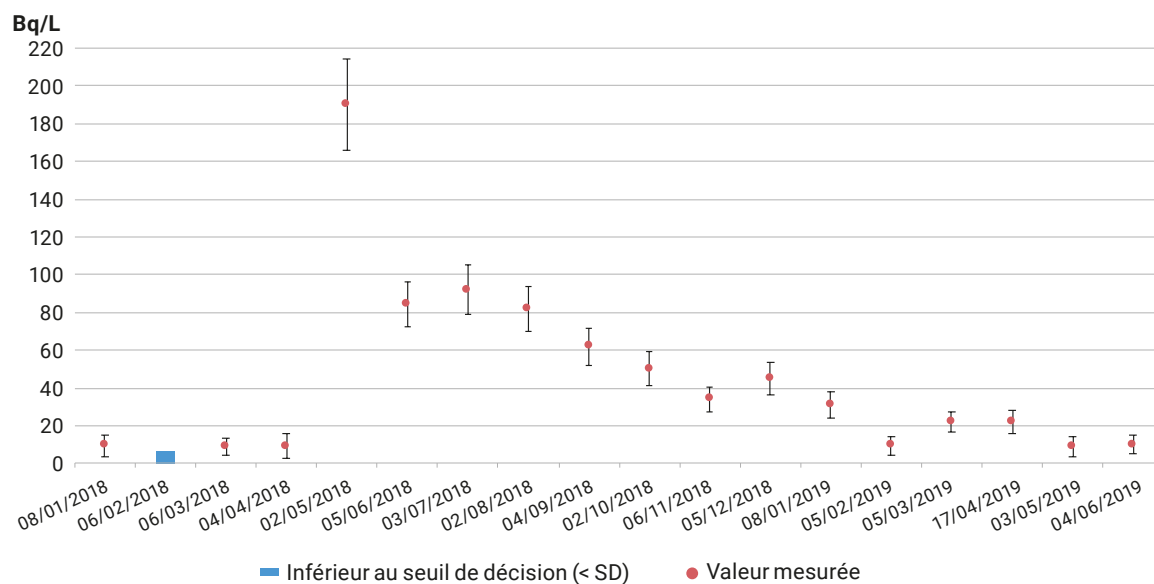
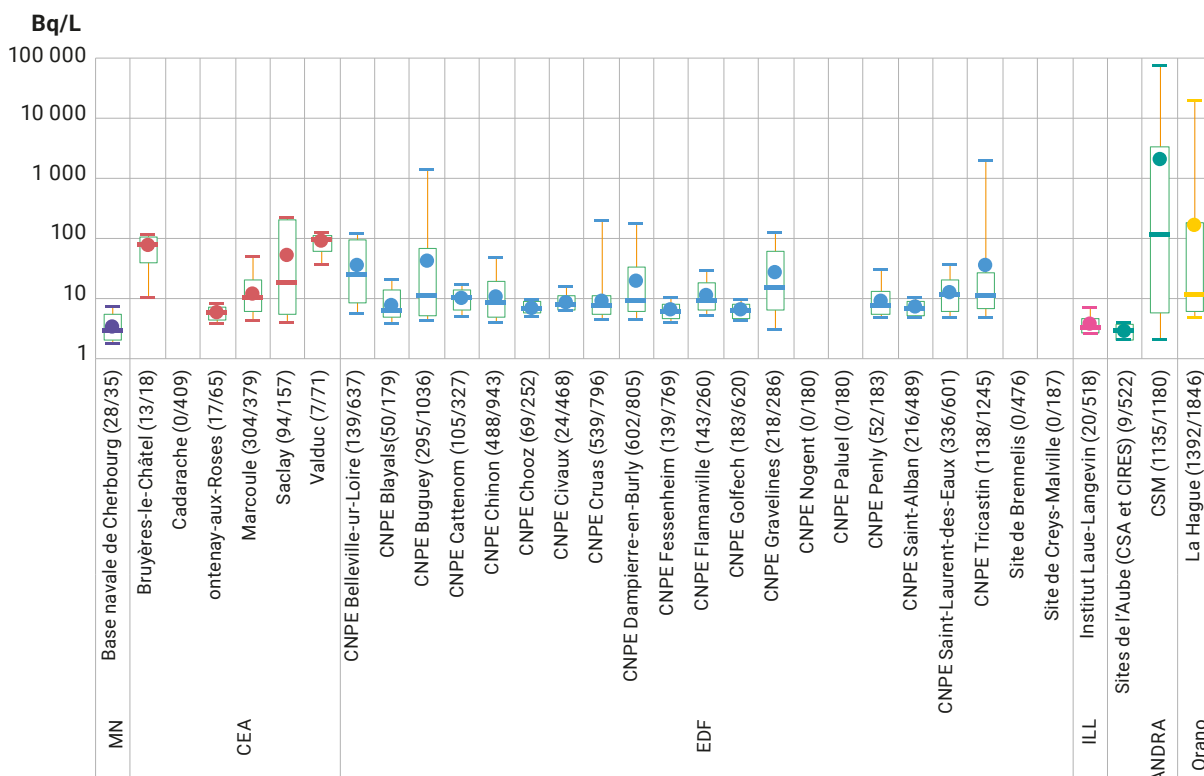


FIGURE 18 / ACTIVITÉ DU TRITIUM DANS L'EAU PRÉLEVÉE AU NIVEAU DU PIÉZOMÈTRE OSEZ042PZ SUR LE CNPE DE CRUAS-MEYSSE (Bq/L)



■ Inférieur au seuil de décision (< SD) ● Valeur mesurée

FIGURE 19 / GAMMES D'ACTIVITÉS DU TRITIUM DANS LES EAUX DE NAPPES PRÉLEVÉS SUR LES SITES NUCLÉAIRES ENTRE 2018 ET 2020 (valeurs significatives uniquement)



La figure 19 présente les gammes d'activités supérieures aux seuils de décision mesurées sur les sites nucléaires français pour la période 2018-2020⁽¹¹⁾ (cf. chapitre 9, figure 1 pour les indicateurs de « Boîtes-à-moustaches »). Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre de valeurs significatives par rapport au nombre total de données transmises dans le RNM – on notera ainsi qu'aucune activité significative n'a été relevée pour les sites de Brennilis, Cadarache, Creys-Malville, Nogent-sur-Seine et Paluel sur la période. Les niveaux mesurés sur la plupart des sites restent cohérents avec la période précédente, et permettent de déterminer les installations pour lesquelles un événement a pu entraîner une augmentation ponctuelle de la concentration du tritium dans les eaux souterraines.

Le tableau 5 détaille les sites et piézomètres pour lesquels des activités supérieures à 100 Bq/L ont été relevées dans le RNM entre 2018 et 2020.

(11) Période 2015-2017 couverte par le précédent bilan de l'état radiologique de l'environnement français.

TABLEAU 5 / DÉTAIL DES SITES ET PIÉZOMÈTRES POUR LESQUELS DES ACTIVITÉS DE TRITIUM SUPÉRIEURES À 100 Bq/L ONT ÉTÉ RELEVÉES DANS LE RNM ENTRE 2018 ET 2020 (Bq/L)

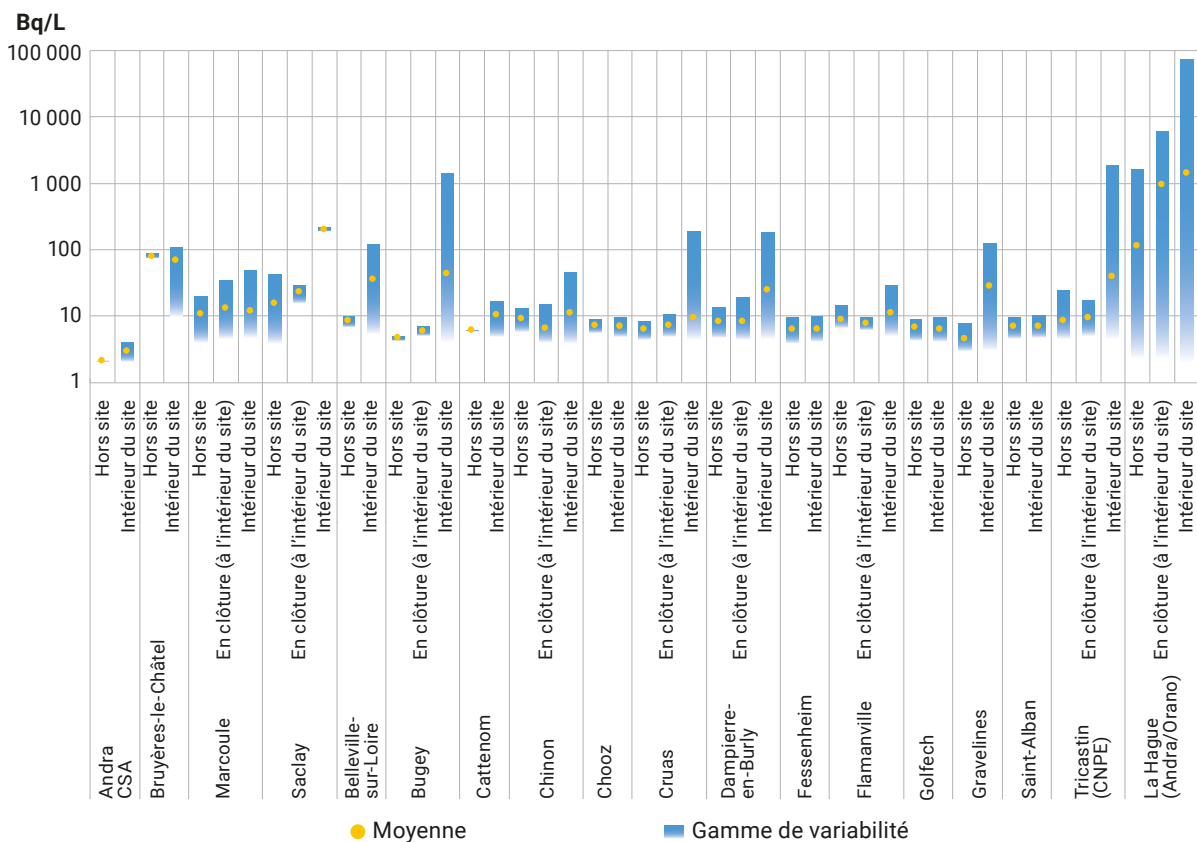
Site	Piézomètre	Activité significative minimale (Bq/L)	Activité significative maximale (Bq/L)
Bruyères-le-Châtel	PZ25	37,00	110,00
CNPE de Belleville-sur-Loire	0SEZ005PZ	8,20	120,00
CNPE du Bugey	0SEZ012PZ	7,30	120,00
	0SEZ137PZ	12,00	370,00
	0SEZ011PZ	6,30	860,00
	0SEZ013PZ	58,00	1 400,00
CNPE de Cruas-Meysse	0SEZ40PZ	8,80	190,00
CNPE de Dampierre-en-Burly	0SEZ002PZ	6,00	176,00
	0SEZ008PZ	67,00	140,00
CNPE de Gravelines	0SEZ004PZ	3,10	125,00
	0SEZ005PZ	54,00	100,00
CNPE du Tricastin	0SEZ026PZ	5,12	140,00
	0SEZ040PZ	11,00	107,00
	0SEZ042PZ	7,76	1 880,00
La Hague (établissement Orano et Andra CSM)	ENV / PIEZO / PZ279	930,00	1 310,00
	ENV / PIEZO / PZ280	61,00	478,00
	ENV / PIEZO / PZ292	54,00	211,00
	ENV / PIEZO / PZ321	24,00	173,00
	ENV / PIEZO / PZ322	6,00	1 060,00
	ENV / PIEZO / PZ326	70,00	330,00
	ENV / PIEZO / PZ373	22,00	18 900,00
	ENV / PIEZO / PZ700	106,00	426,00
	1RAD / PIEZO / PO113	28,30	248,00
	1RAD / PIEZO / PO114	128,00	1 370,00
	1RAD / PIEZO / PO117	280,00	970,00
	1RAD / PIEZO / PO120	3 270,00	22 600,00
	1RAD / PIEZO / PO131	34 400,00	73 000,00
	1RAD / PIEZO / PO132	1 120,00	3 540,00
	1RAD / PIEZO / PO133	202,00	1 690,00
	1RAD / PIEZO / PO134	52,00	570,00
	1RAD / PIEZO / PO135	250,00	920,00
	1RAD / PIEZO / PO136	149,00	5 050,00
	1RAD / PIEZO / PO137	4 000,00	6 000,00
	1RAD / PIEZO / PO138	81,00	1 740,00
	1RAD / PIEZO / PO139	41,00	2 130,00
	1RAD / PIEZO / PO140	191,00	4 360,00
	1RAD / PIEZO / PO142	47,00	292,00
	1RAD / PIEZO / PO143	188,00	2 410,00
	1RAD / PIEZO / PO153	123,00	4 550,00
	1RAD / PIEZO / PO156	31,00	690,00
	1RAD / PIEZO / PO157	11,30	296,00
	1RAD / PIEZO / PO171	71,00	199,00
	1RAD / PIEZO / PO172	66,00	137,00
	1RAD / PIEZO / PO180	600,00	1 830,00
1RAD / PIEZO / PZ322	6,00	1 060,00	
1RAD / PIEZO / PZ700	320,00	353,00	
1RAD / PIEZO / PZ715	89,00	1 600,00	
Saclay	F53	190,00	220,00
Valduc	R111	77,00	103,00
	R14	87,00	127,00

Seuls trois piézomètres au niveau du Centre de stockage de la Manche collectent des eaux présentant un dépassement de la valeur guide de 10 000 Bq/L fixée par l'OMS, étant entendu qu'elles ne font pas l'objet d'une consommation humaine.

L'implantation des piézomètres réglementaires peut être réalisée à l'intérieur comme à l'extérieur de l'emprise des sites nucléaires. En comparant les mesures obtenues lorsque ces deux types de localisation existent (intra et hors site), on peut constater que, dans la quasi-totalité des cas, les activités sont moins élevées – parfois d'un ordre de grandeur – dans les échantillons prélevés hors du périmètre des sites ; le marquage au niveau des installations est soumise à une dilution importante avant d'atteindre la limite géographique du site.

Ainsi, à l'exception des sites de La Hague (Andra et Orano) pour les raisons indiquées précédemment, et des sites de Marcoule et Bruyères-le-Châtel, dont le tritium a été durant des décennies au cœur d'activités industrielles ou de recherches aujourd'hui arrêtées, et du site de Valduc, à proximité duquel les eaux de deux sources surveillées par l'IRSN présentent des activités en tritium respectives de l'ordre de 20 Bq/L et 50 Bq/L, les activités moyennes de tritium dans les eaux souterraines prélevées en bordure ou à l'extérieur immédiat des sites nucléaires français sont inférieures à 10 Bq/L.

FIGURE 20 / GAMMES D'ACTIVITÉS DU TRITIUM AU NIVEAU DES PIÉZOMÈTRES DE SURVEILLANCE RÉGLEMENTAIRE EN FONCTION DE LEUR SITUATION GÉOGRAPHIQUE (hors site et intérieur du site) POUR LA PÉRIODE 2018-2020



6.6. CAMPAGNE D'ÉTUDE DU TRITIUM DANS LA LOIRE À SAUMUR

En juin 2019, l'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest (ACRO) a rendu publics les résultats d'une campagne de mesure citoyenne de la radioactivité dans la Loire et la Vienne, notamment en aval des 5 CNPE présents sur ces fleuves : Belleville-sur-Loire, Dampierre-en-Burly, Saint-Laurent-des-Eaux, Chinon et Civaux (sur la Vienne) (figure 21).

Parmi les résultats présentés, une mesure atypique d'activité en tritium de 310 Bq/L sur un prélèvement d'eau de la Loire réalisé à Saumur le 21 janvier 2019 a été relevée. Suite à la publication de ce résultat, l'ASN et l'IRSN ont engagé des investigations afin de comprendre l'origine de cette valeur élevée.

Les premières évaluations de l'IRSN des niveaux de tritium dans la Loire et la Vienne, menées à partir des rejets déclarés par les CNPE d'EDF à l'ASN et par modélisation en faisant l'hypothèse de l'atteinte d'un « bon mélange » (situation dans laquelle la concentration en tritium serait homogène sur toute la section du fleuve à cet endroit), n'ont pas permis

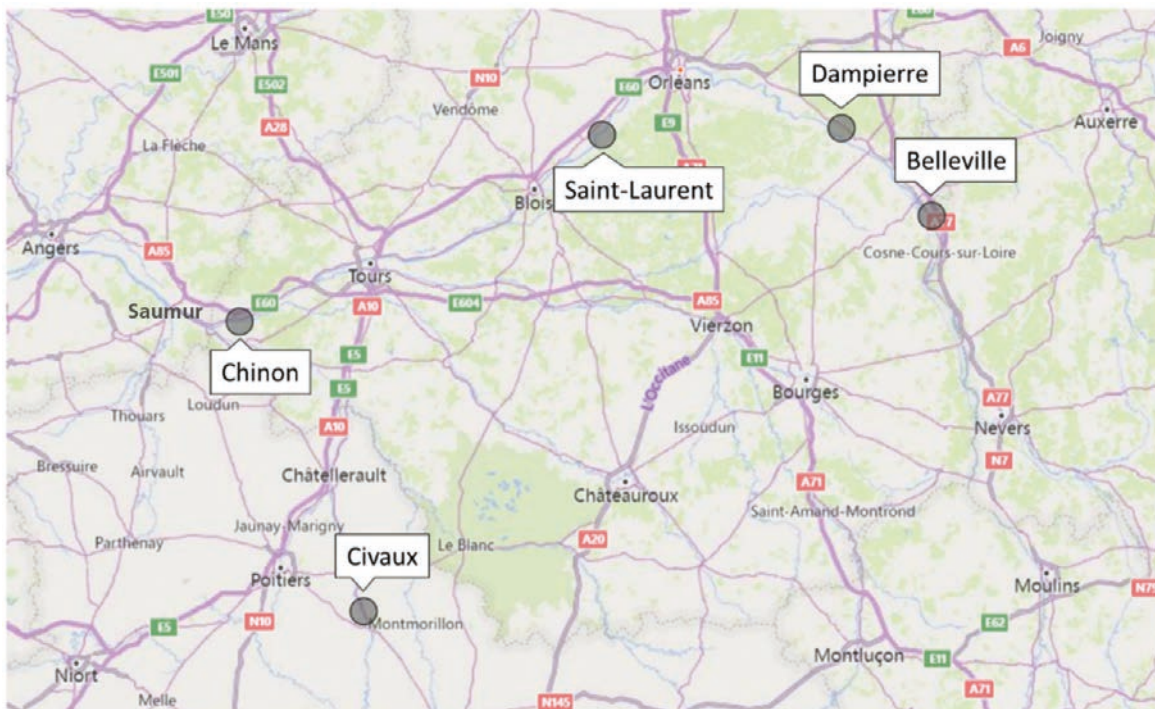
de reproduire une telle concentration à Saumur à cette période. L'hypothèse d'un mélange inhomogène des rejets du CNPE de Chinon, entraînant une hétérogénéité de distribution du tritium dans le lit du fleuve sur de longues distances du fait de conditions hydrauliques particulières, a donc été envisagée pour expliquer cette mesure.

L'ACRO a publié au RNM des mesures en différents points du pont Cessart en 2019 et 2020 montrant, à certaines dates, une hétérogénéité des concentrations en tritium suivant le transect du pont.

Afin de poursuivre ses investigations et d'étudier cette hypothèse, l'IRSN a mis en place une campagne de prélèvements à haute fréquence de l'eau de la Loire à Saumur, dans le but :

- d'étudier la reproductibilité de la mesure relevée par l'ACRO dans des conditions proches de celles du prélèvement de janvier 2019 (températures froides, débit, rejet...);
- de comparer les résultats de mesures à ceux évalués par modélisation ;
- de partager les enseignements tirés avec les parties prenantes.

FIGURE 21 / LOCALISATION DES CNPE DE LA LOIRE ET DE LA VIENNE



Afin d'associer l'ensemble des parties prenantes à cette étude et de partager les résultats, un comité de suivi a été mis en place, constitué de l'ACRO, de son réseau de préleveurs citoyens, de membres de la CLI de Chinon, de l'Association nationale des comités et commissions locales d'information (ANCCLI), du réseau Loire – Alerte, de la Direction départementale des territoires du Maine-et-Loire (DDT 49), de la Mairie de Saumur, d'EDF, de l'ASN et de l'IRSN.

Cette importante campagne de prélèvements de l'eau de la Loire, au pont Cessart de Saumur, s'est déroulée du 09/11/2020 au 08/04/2021, avec :

- des prélèvements manuels chaque jour par un laboratoire sous-traitant de l'IRSN, à raison de trois prélèvements quotidiens simultanés en trois points du pont (1/4 à gauche, milieu et 1/4 droite, à la même heure) (figure 22) ;
- des prélèvements automatiques toutes les 12 h en amont du pont Cessart, en rive droite et en rive gauche, au moyen d'hydrocollecteurs réfrigérés.

FIGURE 22 / LOCALISATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUES (hydrocollecteurs) ET MANUELS, DES EAUX DE LA LOIRE À SAUMUR



Hydrocollecteur en rive gauche



Hydrocollecteur en rive droite



Intervention des sapeurs-pompiers pour installer les hydrocollecteurs



Prélèvements sur le pont Cessart par Inovalys

Ces prélèvements étaient transmis chaque semaine aux laboratoires de l'IRSN au Vésinet pour détermination de l'activité en tritium. Tous les résultats (figure 24) ont été communiqués aux parties prenantes dans le cadre du comité de suivi et mis à disposition du public sur le site internet du Réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement (RNM, www.mesure-radioactivite.fr). Par ailleurs, des mesures physico-chimiques de pH, température (figure 23) et conductivité ont été réalisées sur les échantillons au moment du prélèvement. Certains de ces éléments avaient pour but de déterminer si des prélèvements avaient été réalisés dans des conditions de débit et de température similaires à celles du 21 janvier 2019⁽¹²⁾, ce qui fut le cas sur la période courant de fin novembre - début décembre 2020, période correspondant d'ailleurs aux débits les plus faibles relevés durant la campagne.

L'IRSN a réalisé en parallèle grâce à son logiciel SYMBIOSE des estimations des activités en tritium dans la Loire en fonction de leur origine (rejet de tel ou tel CNPE) à partir d'une modélisation de la section de la Loire comprise entre l'amont du CNPE de Chinon et l'aval du pont Cessart. Cette dernière a été élaborée grâce au traitement de photographies satellitaires, des débits de la Loire mesurés par les stations du

réseau HYDRO et des données des registres de rejets transmis par EDF. Les résultats de ces calculs ont été confrontés :

- aux résultats des mesures des échantillons prélevés dans le cadre de la campagne au pont Cessart (figure 24) ;
- aux résultats des mesures des aliquotes journalières prélevées par EDF avec son hydrocollecteur situé à la station multi-paramètres (SMP) positionnée en aval de chacun de ses CNPE dans le cadre de la surveillance réglementaire prescrite par l'ASN.

Sur la durée de l'étude, les mesures réalisées au pont Cessart ont varié entre le seuil de décision (2,5 Bq/L) et un maximum d'environ 60 Bq/L. Aucune mesure atypique à des niveaux comparables à la mesure de janvier 2019 n'a été relevée. De façon générale, la modélisation rend bien compte des activités mesurées au pont Cessart à Saumur :

- en supposant que la Loire et la Vienne ne se mélangent pas pour la plupart des régimes hydrauliques ;
- en supposant que la Loire et la Vienne se mélangent quand les débits sont faibles (ce qui favoriserait le mélange des cours d'eau).

(12) Eau de la Loire à 5,5 °C et débit de 320 m³/s.

FIGURE 23 / TEMPÉRATURES DES PRÉLÈVEMENTS ET DÉBITS DE LA LOIRE DU PONT CESSART PENDANT LA CAMPAGNE

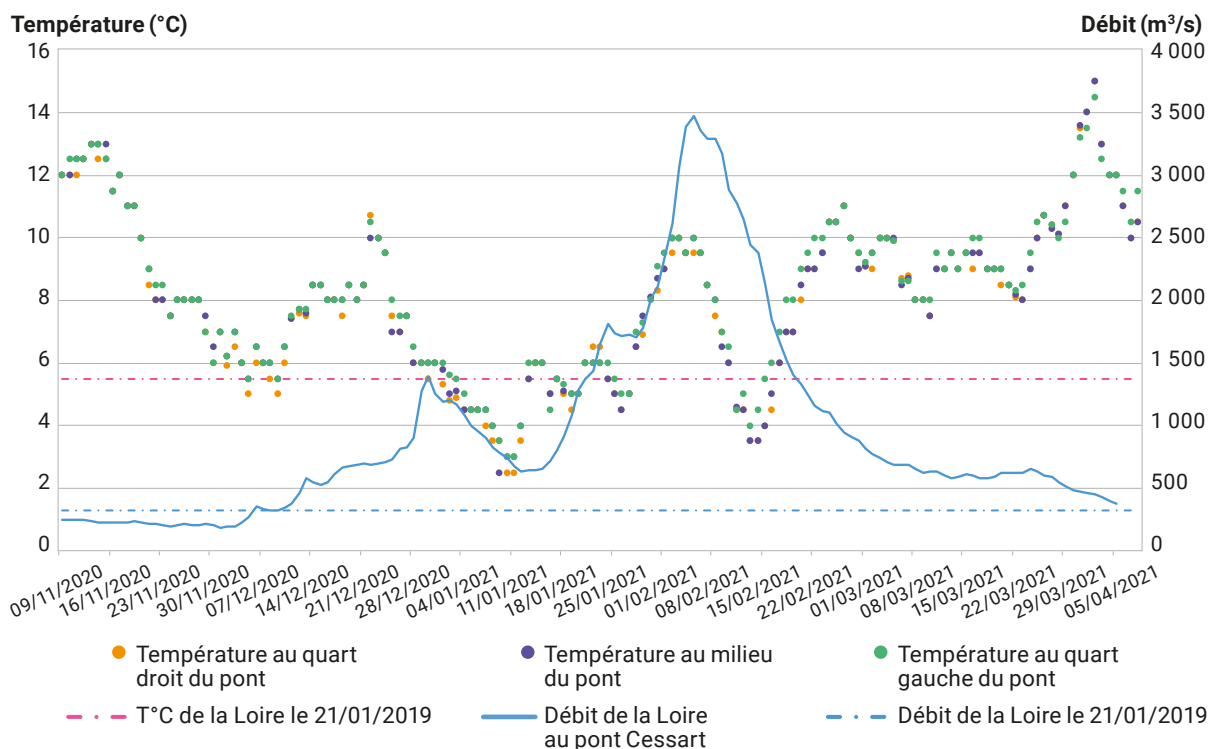
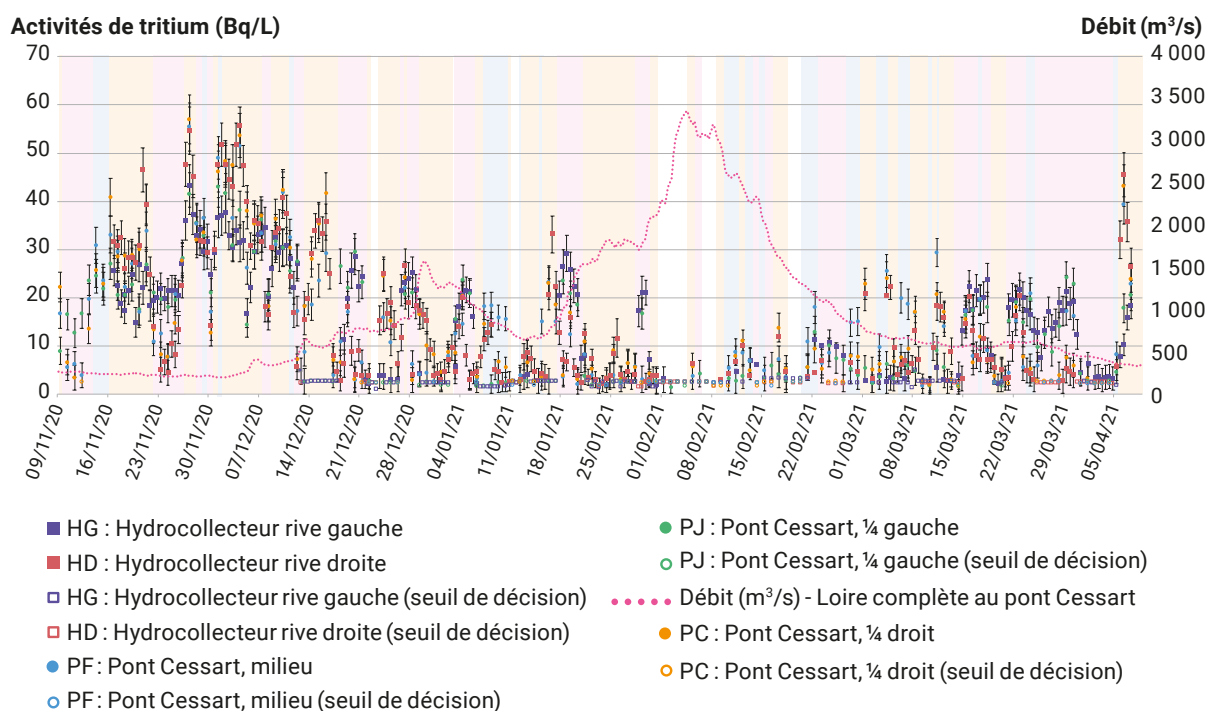


FIGURE 24 / ACTIVITÉS DE TRITIUM DES EAUX (Bq/L) ET DÉBITS DE LA LOIRE (m³/s), MESURÉS AU NIVEAU DU PONT CESSART À SAUMUR DURANT L'ÉTUDE



Au niveau du pont Cessart, la modélisation, en supposant que la Loire et la Vienne ne se mélangent pas, rend bien compte de l'évolution de l'activité volumique en tritium. Dans la quasi-totalité des cas :

- la masse d'eau sur la gauche du fleuve est très majoritairement issue de la Vienne, avec des mesures inférieures au seuil de décision en l'absence de rejets de Civaux ou proches des concentrations prédites par la modélisation à partir des rejets de Civaux sans mélange de la Loire et de la Vienne, et ce quels que soient les rejets des CNPE de la Loire ;
- le côté droit est sous l'influence des CNPE amont de la Loire, et partiellement sous influence du CNPE Chinon, et peu influencée par la Vienne. Les mesures sont en général comprises entre la contribution des CNPE situés en amont de Chinon et la contribution totale des CNPE de la Loire (incluant Chinon) prédites par la modélisation sans mélange de la Loire et de la Vienne ;
- la zone au milieu du pont est influencée par les rejets de tous les CNPE. En l'absence de rejets de Chinon, les mesures au centre sont le plus souvent comprises entre celles à gauche (influencées par les rejets de Civaux) et celles à droite (rejets des CNPE amont de la Loire). Pendant les rejets de Chinon, les mesures au centre sont le plus souvent proches ou supérieures de celles du côté droit, voire très supérieures en l'absence de contribution des CNPE amont, témoignant ainsi de l'influence des rejets de Chinon.

Le schéma synoptique (figure 25) synthétise ces observations.

En conclusion, les mesures réalisées au cours de cette étude n'ont pas mis en évidence de concentration en tritium atypique au Pont Cessart à Saumur, les mesures se situant entre 2,5 Bq/L et environ 60 Bq/L,

et compris dans des conditions similaires (fin novembre 2020 - début décembre 2020) à celles de janvier 2019.

Cette étude a permis d'améliorer la modélisation 1D et de développer la modélisation 2D de la dispersion des rejets entre Chinon et Saumur qui rendent bien compte des mesures de concentration en tritium dans la Loire.

Il a été constaté que le mélange des rejets déclarés par l'exploitant du CNPE de Chinon :

- n'est pas complet au niveau de la SMP aval : lors du passage des rejets de Chinon, les mesures peuvent être proches, inférieures ou supérieures à la prévision de la modélisation supposant leur mélange homogène ;
- n'est également pas complet jusqu'au pont Cessart à Saumur.

Il a de plus été constaté que les prélèvements à la SMP aval peuvent être représentatifs ou non des rejets du CNPE de Chinon, compte tenu de l'étalement transversal du panache de rejet en fonction du régime hydraulique (correct pour les faibles débits et en limite de veine de rejets pour des débits plus élevés).

Cette étude, réalisée à partir des rejets déclarés au titre de la réglementation, a montré que si le mélange est imparfait au pont Cessart, il ne permet cependant pas d'expliquer la mesure à 310 Bq/L publiée par l'ACRO faite sur un prélèvement à Saumur en janvier 2019. Les mesures et les modélisations n'ont pas permis de reproduire une telle activité à Saumur malgré des conditions similaires.

L'ensemble des résultats de l'étude ainsi que les conclusions et recommandations qui en ont été tirés ont été partagés avec les parties prenantes et ont été mis en ligne dans un rapport de synthèse, disponible sur le site www.irsn.fr.

FIGURE 25 / SCHÉMA SIMPLIFIÉ DES ZONES D'INFLUENCES DES REJETS DES CNPE DE LA LOIRE ET DE LA VIENNE DANS L'EAU DE LA LOIRE AU NIVEAU DU PONT CESSART À SAUMUR - NOVEMBRE 2020





© IRSN



07

COMPRENDRE LA RADIOACTIVITÉ ET LES EXPOSITIONS DES PERSONNES QU'ELLE PEUT ENGENDRER

7.1. LES RADIONUCLÉIDES	366
7.2. LES RAYONNEMENTS	367
7.3. L'ACTIVITÉ : LES BECQUERELS (Bq)	367
7.4. LA PÉRIODE RADIOACTIVE	368
7.5. LES MODES D'EXPOSITION À LA RADIOACTIVITÉ ENVIRONNEMENTALE	368
7.6. LA DOSE : LE SIEVERT (Sv)	370
7.7. LA RADIOPROTECTION	373

07

COMPRENDRE LA RADIOACTIVITÉ ET LES EXPOSITIONS DES PERSONNES QU'ELLE PEUT ENGENDRER

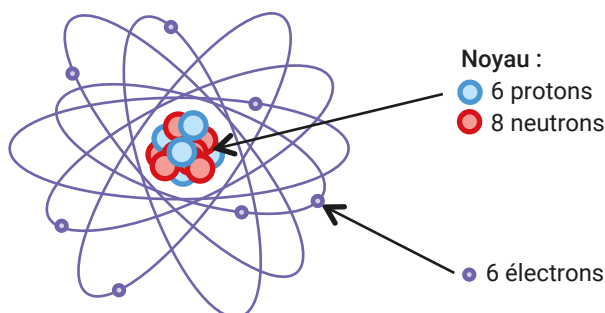
7.1. LES RADIONUCLÉIDES

La matière est constituée de molécules qui sont des combinaisons d'atomes de différents éléments chimiques : atomes de carbone, d'hydrogène, de potassium, de calcium, de fer, de plomb, d'uranium, etc. Un atome est composé d'un noyau central constitué notamment de protons et de neutrons, ainsi que d'un nuage périphérique composé d'électrons (cf. figure 1).

Certains noyaux atomiques sont instables, radioactifs, et se transforment spontanément en d'autres noyaux : on dit qu'ils se désintègrent.

Chacun des éléments chimiques peut présenter des noyaux différents dont certains sont radioactifs ; ce sont des radionucléides (ou isotopes radioactifs). L'hydrogène a un radionucléide : le tritium. Parmi les radionucléides du carbone figure notamment le carbone-14. Le césium-134 et le césium-137 sont deux des quinze isotopes connus du césium. Certains éléments chimiques très lourds comme l'uranium ou le plutonium n'ont aucun noyau stable, seulement des noyaux radioactifs.

FIGURE 1 / REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE D'UN ATOME DE CARBONE-14



7.2. 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 (figure 2 et tableau 1) :

- les rayonnements alpha constitués par un flux de noyaux d'hélium (formés de deux protons et de deux neutrons) ; ils peuvent être arrêtés par une simple feuille de papier ;
- les rayonnements bêta, constitués par un flux d'électrons, ils peuvent être arrêtés par une feuille d'aluminium ;
- les ondes électromagnétiques X et gamma ; les plus énergétiques ne sont arrêtées que par de grosses épaisseurs de plomb ou de béton.

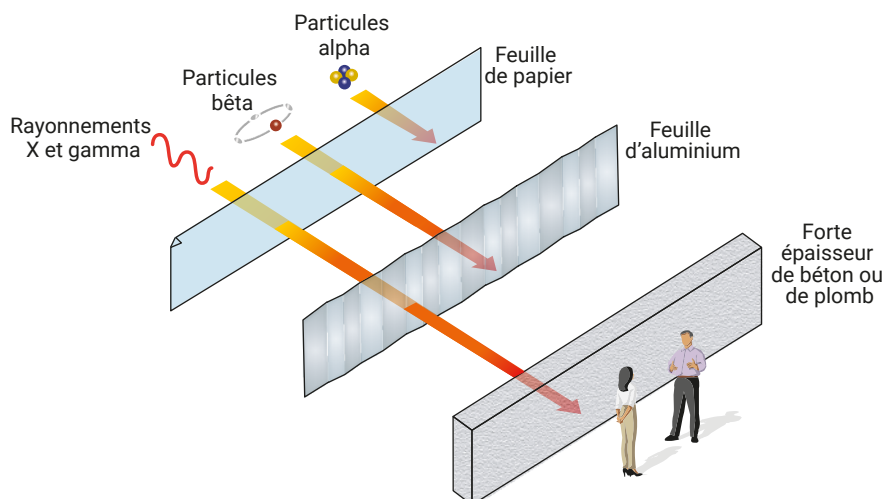
7.3. L'ACTIVITÉ : LES BECQUERELS (Bq)

L'activité d'un radionucléide est le nombre de désintégration qu'il produit par seconde (1 Bq = 1 désintégration par seconde). Le nombre de désintégrations par seconde étant proportionnel au nombre d'atomes radioactifs, l'activité d'un radionucléide correspond à une quantité de ce radionucléide. Pour quantifier les rejets radioactifs d'une installation nucléaire, le becquerel étant une unité très petite, on utilise des multiples : kilo-becquerel kBq (= 1 000 Bq), méga-becquerel MBq (= 1 000 kBq), giga-becquerel GBq (= 1 000 MBq), tera-becquerel TBq (= 1 000 GBq).

Dans l'environnement, l'activité est souvent rapportée à une masse ou un volume. L'activité volumique (Bq/L ou Bq/m³) ou l'activité massique (Bq/kg) d'un radionucléide dans un échantillon de matière est une façon d'exprimer la teneur de ce radionucléide dans l'échantillon. Les activités dans l'environnement sont souvent très faibles et on utilise des sous-multiples : par exemple, milli-becquerel par kilogramme mBq/kg (= 0,001 Bq/kg), micro-becquerel par mètre cube $\mu\text{Bq/m}^3$ (= 0,000001 Bq/m³).

En mesurant l'activité des radionucléides grâce aux rayonnements qu'ils émettent, il est possible de détecter des quantités (masses) infimes de matière radioactive. Ainsi, une activité massique de 600 becquerels de césium-137 par kilogramme correspond à une teneur en césium de 0,00000086 gramme (0,86 microgramme) de césium-137 par tonne.

FIGURE 2 / PARCOURS DES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENT



7.4. LA PÉRIODE RADIOACTIVE

La désintégration d'un atome entraîne soit la formation d'un autre atome radioactif (d'un autre radionucléide), soit la production d'un atome stable (non radioactif). Elle entraîne donc la diminution de l'activité du radionucléide considéré.

La période radioactive (ou demi-vie) d'un radionucléide est le temps nécessaire pour que l'activité (le nombre de becquerels) d'un radionucléide donné soit réduite de moitié (figure 3 et tableau 1).

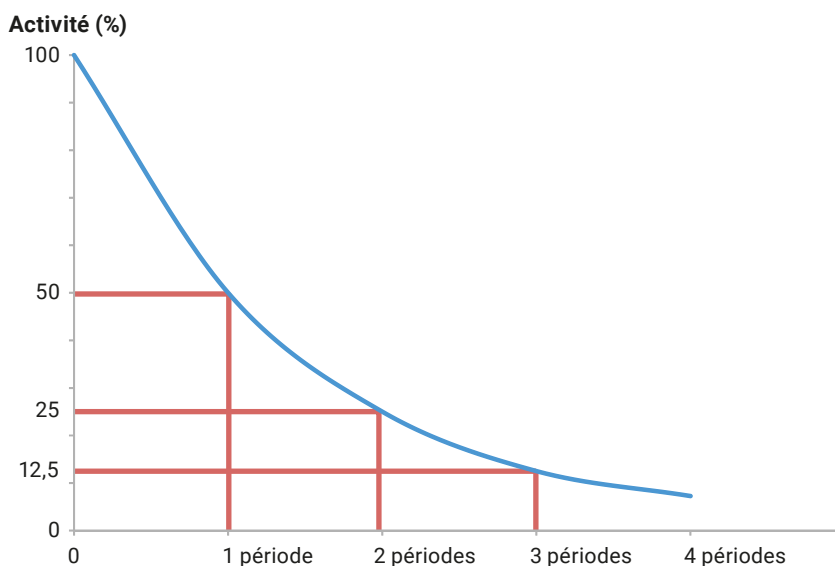
Elle varie suivant le radionucléide d'une fraction de seconde à des milliards d'années. L'uranium-238 a par exemple une demi-vie de près de 4,5 milliards d'années. C'est cette longue période qui explique qu'on en trouve encore sur Terre à l'état naturel. La période de l'uranium-235 est de près de 700 millions d'années ; c'est ce qui explique que, comparativement à l'uranium-238, on en trouve relativement peu (il ne constitue que 0,7 % de l'uranium naturel).

7.5. LES MODES D'EXPOSITION À LA RADIOACTIVITÉ ENVIRONNEMENTALE

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

Si la personne est exposée à une source de rayonnement qui lui est extérieure, le sol par exemple, l'exposition est externe. Cette exposition concerne essentiellement les radionucléides émetteurs gamma ou X car ces rayonnements ont un long parcours dans l'air et peuvent pénétrer profondément dans l'organisme (figure 2). Elle est faible pour les radionucléides émetteurs alpha purs (sans émission gamma comme ^{238}Pu ou $^{239+240}\text{Pu}$ par exemple) ou pour les radionucléides émetteurs bêta purs de faible énergie (comme le tritium et le carbone-14) qui sont arrêtés par la peau. L'exposition externe diminue très vite avec la distance par rapport à la source et cesse si l'on s'en écarte suffisamment.

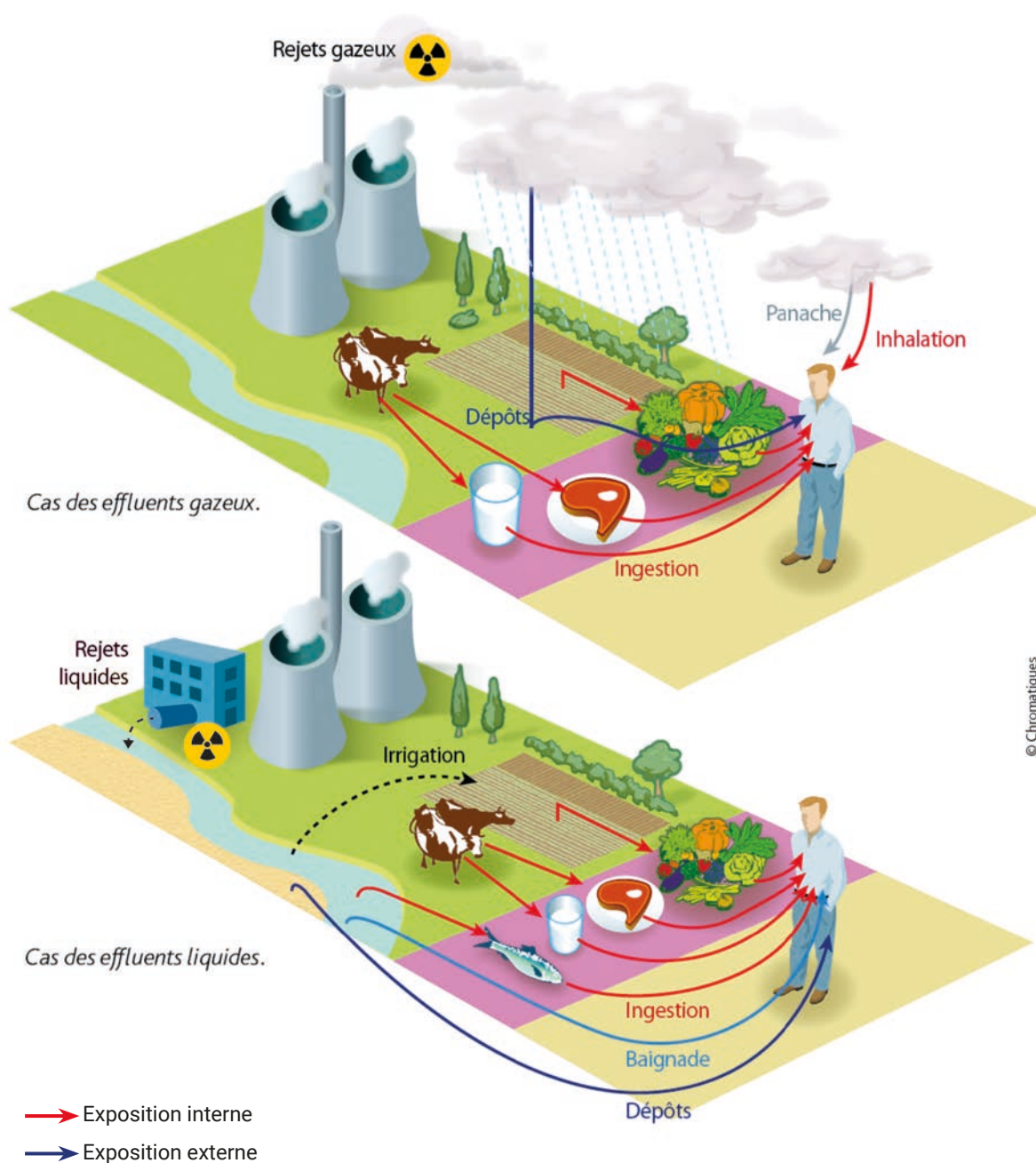
FIGURE 3 / REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE LA DÉCROISSANCE RADIOACTIVE



Si le radionucléide pénètre dans l'organisme par inhalation ou ingestion, l'exposition est interne. Cette exposition va persister jusqu'à ce que le radionucléide disparaisse par décroissance radioactive ou soit éliminé par l'organisme. Cette élimination peut être très rapide (cas du tritium éliminé avec l'eau) ou très

longue (cas du plutonium qui se fixe notamment dans les os). Cette exposition est particulièrement pénalisante pour les radionucléides émetteurs alpha dont le rayonnement très énergétique percute les cellules des tissus vivants situées à proximité immédiate de l'endroit du corps où ils se sont fixés.

FIGURE 4 / MODE D'EXPOSITION D'UNE PERSONNE À LA RADIOACTIVITÉ ENVIRONNEMENTALE



7.6. LA DOSE : LE SIEVERT (Sv)

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 lorsqu'il est ingéré ou inhalé.

Par ailleurs, les différents organes sont plus ou moins sensibles aux rayonnements ionisants. Aussi, suivant les parties de l'organisme touchées par les rayonnements, les effets pourront être différents. 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). Pour les expositions qui résultent de la radioactivité environnementale, cette unité est très grande et on utilise des sous-multiples : le millisievert (1 mSv = 0,001 Sv) ou le microsievert (1 μ Sv = 0,000001 Sv). Dans ce bilan radiologique,

les doses efficaces sont estimées au corps entier pour l'individu adulte et pour une durée d'exposition d'un an (mSv/an ou μ Sv/an).

Un facteur de dose permet d'estimer la dose en sievert à partir des activités environnementales mesurées (Bq/kg dans les denrées, Bq/m² dans les sols et Bq/m³ dans l'air notamment). Le facteur de dose qui permet d'estimer la dose consécutive à l'ingestion d'un radionucléide est exprimé en Sv/Bq ingéré ; celle pour estimer la dose par inhalation en Sv/Bq inhalé ; et l'exposition externe en Sv/h par Bq/m³ si le radionucléide est dans l'air ou en Sv/h par Bq/m² s'il est sur le sol. La figure 5 montre que les facteurs de dose sont très différents suivant le radionucléide et le mode d'exposition.

Pour évaluer la dose efficace annuelle potentielle qui résulte de l'ingestion, il faut estimer la quantité de denrées concernées ingérée par an (tableau 2). L'essentiel de l'influence des installations nucléaires étant limité à leur voisinage immédiat, il s'agit d'estimer la part de denrées locales consommées.

FOCUS LES EFFETS DES RAYONNEMENTS SUR LA SANTÉ

importante, nécrose, baisse des globules blancs, nausée et dans le cas extrême, le décès de l'individu. Les activités présentes dans l'environnement ne peuvent en aucun cas conduire à ce genre de conséquences. Les expositions à la radioactivité environnementale sont de l'ordre de mille à un million de fois plus faibles que celles susceptibles de produire les effets cités précédemment. Elles peuvent cependant être à l'origine, de manière aléatoire, de pathologies qui apparaissent des années, voire des décennies plus tard (effets stochastiques), essentiellement des cancers. Ces conséquences sont assimilables à celles qui peuvent résulter du tabagisme ou de l'apparition de cancer de la peau après des expositions répétées au soleil.

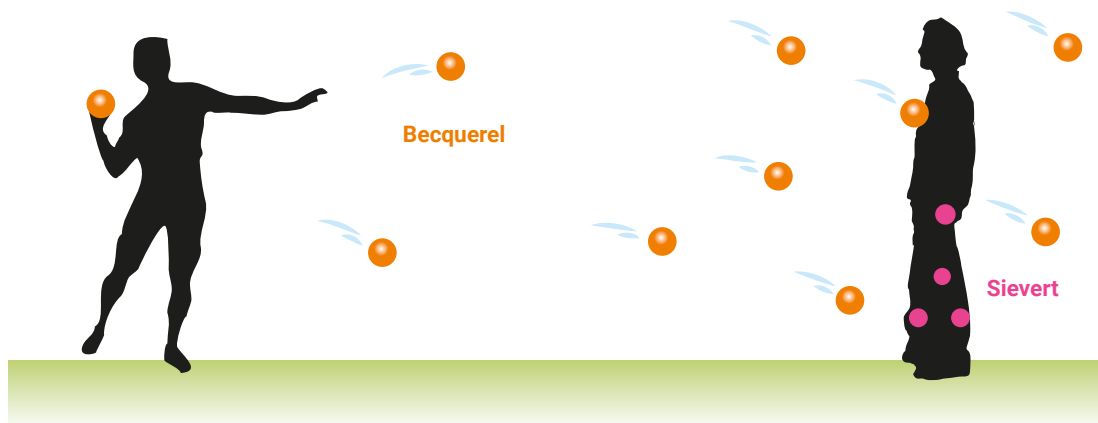


TABLEAU 1 / CARACTÉRISTIQUES DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES MESURÉS DANS L'ENVIRONNEMENT

Radionucléide	Période radioactive (an)	Rayonnement		Origine
		Nature	Énergie	
³ H	12,3	bêta	très faible énergie	1, 2 et 3
¹⁴ C	5 730	bêta	faible énergie	1, 2 et 3
⁹⁰ Sr-Y	28	bêta	forte énergie	2 et 3
⁴⁰ K	1 260 000 000	bêta et gamma	forte énergie	1
^{110m} Ag	0,68	bêta et gamma	forte énergie	2
¹³⁴ Cs	2,1	bêta et gamma	forte énergie	2
⁶⁰ Co	5,3	bêta et gamma	forte énergie	2
¹³⁷ Cs-mBa	30	bêta et gamma	forte énergie	2, 3 et 4
¹⁰⁶ Ru-Rh	1	bêta et gamma	forte énergie	2
¹²⁹ I	15 700 000	bêta et gamma	faible à moyenne énergie	1 et 2
²²⁶ Ra	1 600	alpha et gamma	forte énergie	1
²¹⁰ Po	0,38	alpha	forte énergie	1
²³⁸ U	4 500 000 000	alpha	forte énergie	1 et 2
²³⁸ Pu	88	alpha	forte énergie	2 et 3
²³⁹ Pu	24 000	alpha	forte énergie	2 et 3

1 : naturel* / 2 : rejets d'installation nucléaire / 3 : rémanence des essais d'armes nucléaires* / 4 : rémanence de l'accident de Tchernobyl*
* Cf. chapitre 2.

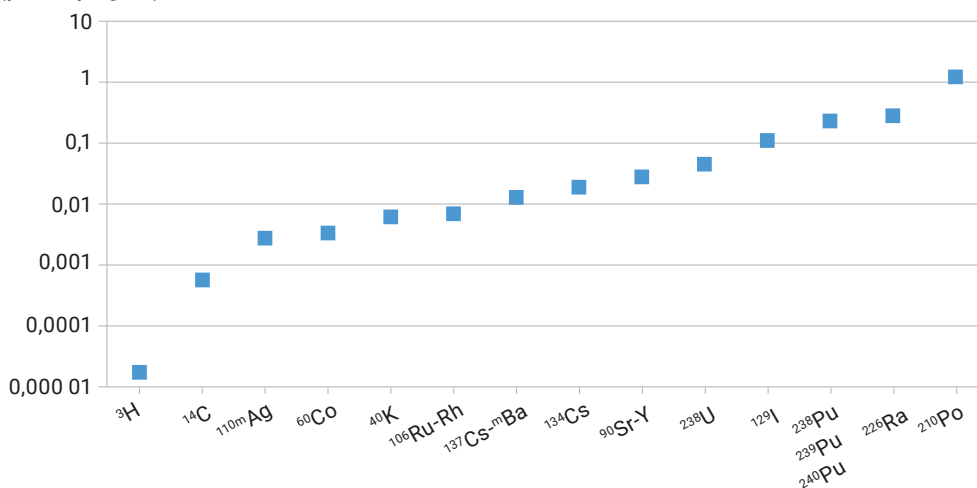
TABLEAU 2 / MODE DE CALCUL DES DOSES PAR EXPOSITIONS EXTERNE ET INTERNE À PARTIR DES ACTIVITÉS ENVIRONNEMENTALES

Exposition externe	=	Activé surfacique ou volumique en Bq/m ² ou Bq/m ³	X	Temps d'exposition en h	X	Coefficient de dose en Sv/h par Bq/m ² ou Sv/h par Bq/m ³
Exposition interne	=	Activé massique ou volumique (air, denrées) en Bq/kg ou Bq/L de denrées et Bq/m ³ d'air	X	Quantité d'air inhalée ou de denrées ingérée m ³ d'air, L ou kg de denrées	X	Coefficient de dose en Sv/Bq inhalé ou ingéré

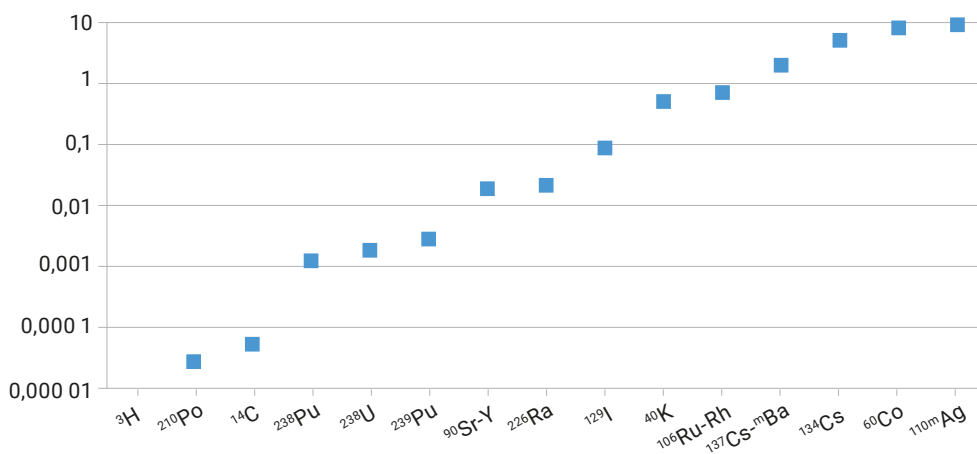
FIGURE 5 / DOSE EFFICACE POUR UNE INGESTION UNITAIRE ($\mu\text{Sv/Bq}$) ET DÉBIT DE DOSE DANS L'AIR PAR IRRADIATION POUR UNE ACTIVITÉ SURFACIQUE UNITAIRE ($\mu\text{Sv/heure par MBq/m}^2$) POUR LES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES MESURÉS DANS L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS

Pour une même activité ingérée ou pour une même activité déposée sur le sol, les doses générées par les radionucléides sont très différentes. Elles dépendent de la nature du rayonnement et de son énergie, ainsi que du devenir du radionucléide dans l'organisme dans le cas de l'ingestion. En raison notamment de son rayonnement bêta de très faible énergie, le tritium est près de 10 millions de fois moins radiotoxique par ingestion que le polonium-210. Il ne produit par ailleurs aucune irradiation externe. De manière générale les radionucléides émetteurs alpha (plutonium, radium, polonium et uranium) sont les plus radiotoxiques par ingestion. En raison de leur rayonnement gamma de forte énergie, l'argent-110m, le cobalt-60, les césiums déposés à la surface du sol sont les plus irradiants dans l'air.

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



Débit de dose annuelle dans l'air par irradiation pour une activité surfacique au sol unitaire ($\mu\text{Sv/heure par MBq/m}^2$)



Les enquêtes alimentaires menées en France montrent que la part de légumes et de fruits locaux peut être très importante (supérieure à 70 %). En revanche la consommation de dérivés céréaliers (pain, pâtes, riz...) produits localement est le plus souvent négligeable. En multipliant la quantité de chaque denrée locale consommée annuellement (kg/an) par l'activité de chaque radionucléide mesurée dans chacune d'elles (Bq/kg) on obtient l'activité incorporée annuellement (Bq/an) pour chaque radionucléide. Le facteur de dose permet ensuite d'estimer la dose efficace par ingestion (Sv/an) à partir de cette activité incorporée.

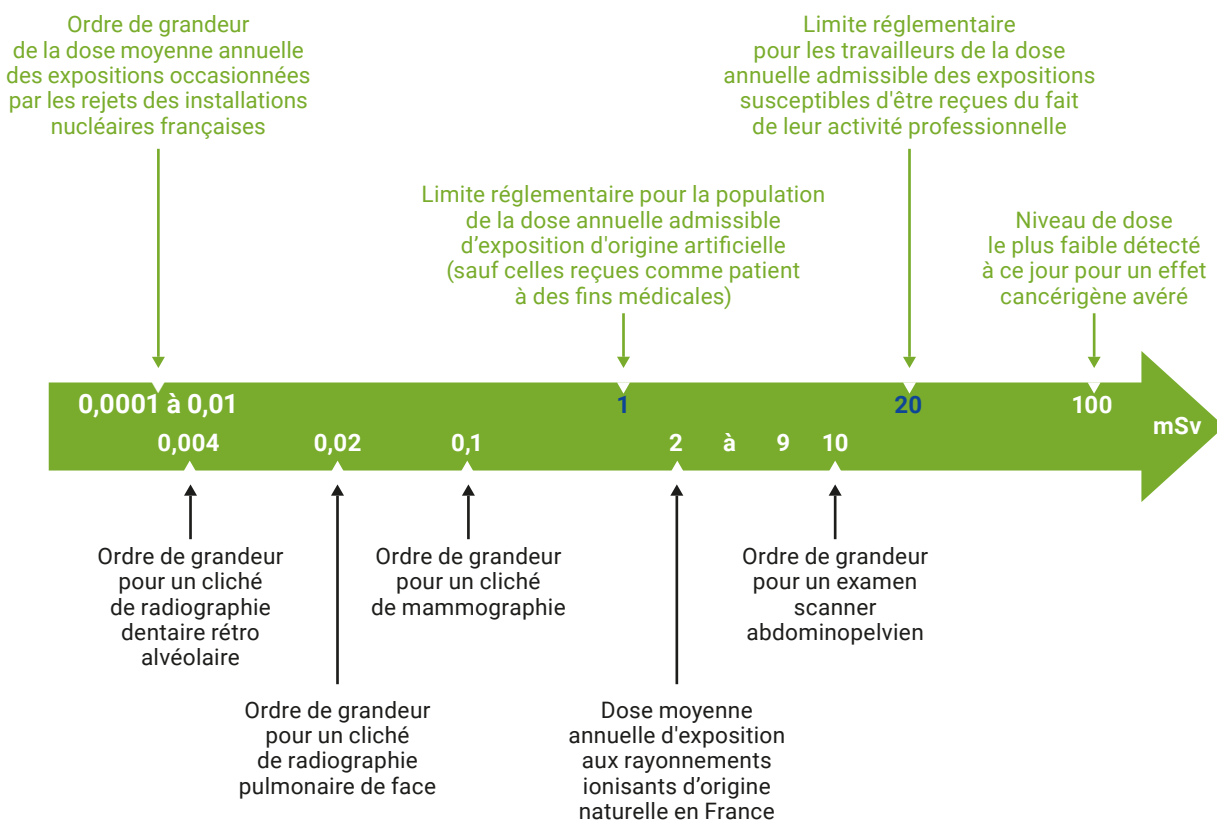
Dans le cas de l'inhalation, il s'agit d'estimer l'activité inhalée par la personne (Bq/an) à partir de l'activité mesurée dans l'air (Bq/m³) en prenant en compte un débit respiratoire moyen (m³/h).

La méthode utilisée pour calculer les doses est détaillée dans le chapitre 9.

7.7. LA RADIOPROTECTION

Le but de la radioprotection est de réduire les risques liés aux rayonnements ionisants en limitant notamment les doses liées aux expositions individuelles. Pour la population, la limite annuelle d'exposition de 1 mSv s'applique à la somme des doses reçues en dehors de la radioactivité naturelle et de l'utilisation médicale des rayonnements ionisants. Les doses calculées dans ce bilan à partir des activités mesurées dans l'environnement sont de l'ordre de 100 à plus de 10 000 fois plus faibles que cette limite.

FIGURE 6 / LIMITES RÉGLEMENTAIRES D'EXPOSITION ET EXEMPLES DE DOSES EFFICACES REÇUES LORS D'EXAMENS MÉDICAUX (mSv)



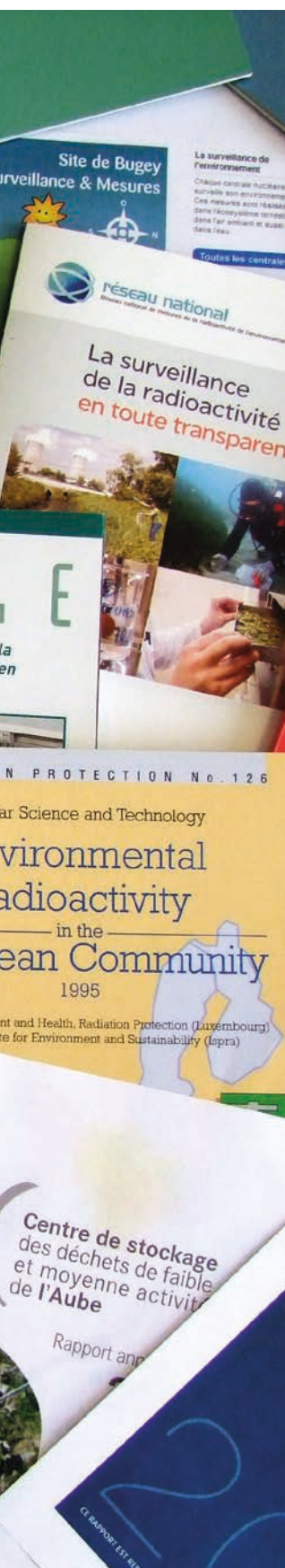


© Leprieux/IRSN

08

LES SOURCES D'INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ ET LA DIFFUSION DES DONNÉES

8.1. SITES INTERNET ET SUPPORTS D'INFORMATION DU PUBLIC	376
Portail internet du réseau national de mesures (RNM) de la radioactivité de l'environnement	376
Sites internet des principaux producteurs de données et des acteurs intéressés	377
Supports d'information de l'Autorité de sûreté nucléaire	377
Le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire	378
Rapports « environnement » des installations nucléaires	378
8.2. DIFFUSION D'INFORMATION DANS LE CADRE DE TRAITÉS OU CONVENTIONS INTERNATIONALES	379
La diffusion des données françaises dans le cadre du traité Euratom	379
Les données transmises à la commission OSPAR	379



08

LES SOURCES D'INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ ET LA DIFFUSION DES DONNÉES

L'information du public concernant la radioactivité de l'environnement est un élément essentiel de la transparence des activités nucléaires. La Loi TSN du 13 juin 2006, intégrée dans le Code de l'environnement, précise que « la transparence en matière nucléaire est l'ensemble des dispositions prises pour garantir le droit du public à une information fiable et accessible... ».

L'ASN, l'IRSN et les acteurs du nucléaire en France proposent de nombreux supports d'information pour répondre d'une part à des obligations légales, et d'autre part aux attentes du public.

La diffusion des données de la surveillance radiologique de l'environnement dépasse le cadre national. En application du traité Euratom et dans le cadre des travaux de la commission OSPAR (paragraphe 8.2), l'IRSN transmet chaque année les résultats de la surveillance qu'il effectue au titre de ses missions. De même, les exploitants nucléaires fournissent également à OSPAR leurs données concernant les rejets radioactifs liquides. Ces données font ensuite l'objet d'études et de publications disponibles pour le public via différents supports d'information.

8.1. SITES INTERNET ET SUPPORTS D'INFORMATION DU PUBLIC

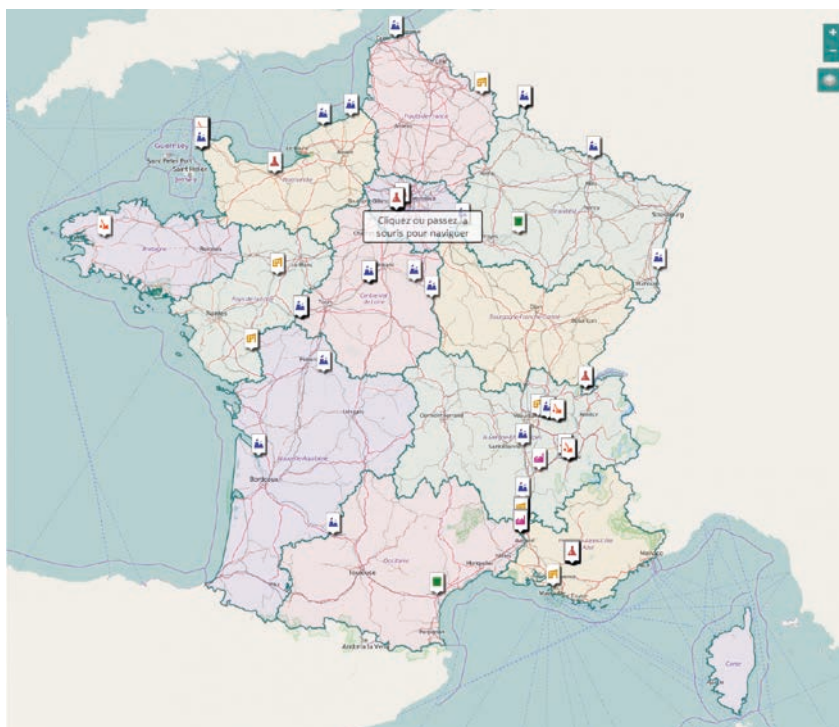
Portail internet du réseau national de mesures (RNM) de la radioactivité de l'environnement

Le site internet du RNM, lancé le 2 février 2010 (cf. chapitre 1), est la principale référence française concernant la surveillance de la radioactivité de l'environnement en offrant notamment un accès centralisé à l'ensemble des résultats de la surveillance environnementale réalisée par l'ensemble des producteurs de données, sur le territoire français.

La base de données du RNM est exploitable par un système d'information qui permet de restituer l'ensemble des informations au public et aux experts, notamment grâce à un portail internet cartographique : www.mesure-radioactivite.fr.

En moyenne plus de 30 000 nouveaux résultats de mesures sont ajoutés chaque mois. Le RNM permet ainsi de disposer d'une vision la plus globale possible sur l'ensemble des mesures de radioactivité réalisées dans l'environnement par les différents acteurs impliqués.

FIGURE 1 / CARTE DE FRANCE INTERACTIVE DES INSTALLATIONS CONTRÔLÉES PAR L'ASN



Sites internet des principaux producteurs de données et des acteurs intéressés

Tous les acteurs de la mesure de la radioactivité de l'environnement disposent de sites internet permettant au public d'obtenir des informations complémentaires sur leurs activités, leurs programmes de contrôle, de surveillance ou d'expertise ponctuelle. Certains sites internet permettent en outre la consultation du rapport annuel d'information du public prévu par le Code de l'environnement, qui comporte notamment une rubrique relative à la nature et aux résultats des mesures des rejets radioactifs et non radioactifs des installations nucléaires dans l'environnement.

Supports d'information de l'Autorité de sûreté nucléaire

L'ASN a mis en place une politique d'information fondée sur des supports complémentaires de manière à rendre l'information accessible à ses différents publics. Le site www.asn.fr est le principal outil d'information du public. Il présente l'actualité de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France, et les prises de position de l'ASN dans ses domaines

de compétences. Par ailleurs, le site donne accès à une base documentaire sur la vie des installations via une navigation simplifiée, un accès aux données amélioré et un téléchargement optimisé des informations ou publications sélectionnées. Depuis 2012, l'ASN a développé sur son site internet une page TV (<https://www.asn.fr/l-asn-informe/videos-de-l-asn>) dédiée à des sujets connexes à la surveillance de l'environnement.

L'ASN met en ligne depuis 2017 une carte de France interactive des installations qu'elle contrôle (figure 1) qui permet d'obtenir des informations générales sur ces installations (description de l'installation, réglementation applicable...) mais également des informations plus détaillées sur les incidents survenus, les lettres de suite d'inspection, ou encore les courriers de position de l'ASN.

Le Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France, publié annuellement, constitue un document de référence qui informe sur l'état des activités contrôlées par l'ASN dans ces deux domaines. L'ASN publie aussi quatre fois par an la revue *Contrôle*, diffusée à plus de 10 000 destinataires en France et à l'étranger.

Ces publications ainsi que les autres supports d'information de l'ASN (la *Lettre de l'ASN*, les plaquettes et fiches d'information à destination du grand public) sont consultables et téléchargeables sur www.asn.fr. Elles sont également à disposition au Centre d'information et de documentation du public de l'ASN.

Le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire

Créé par le Code de l'environnement (article L.125-34), le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) est une instance d'information, de concertation et de débat sur les risques liés aux activités nucléaires et l'impact de ces activités sur la santé des personnes, sur l'environnement et sur la sécurité nucléaire. À ce titre, le Haut Comité peut émettre un avis sur toute question dans ces domaines ainsi que sur les contrôles et l'information qui s'y rapportent. Il peut également se saisir de toute question relative à l'accessibilité de l'information en matière de sécurité nucléaire et proposer toute mesure de nature à garantir ou à améliorer la transparence définie à l'article L. 125-12 du Code de l'environnement.

Il peut enfin être saisi par :

- le ministre chargé de la sûreté nucléaire ;
- les présidents des commissions compétentes de l'Assemblée nationale et du Sénat ;
- le président de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques ;
- les présidents des commissions locales d'information ;
- les exploitants d'installations nucléaires de base de toute question relative à l'information concernant la sécurité nucléaire et son contrôle.

Le HCTISN est composé de membres nommés pour six ans par décret, au nombre de quatre pour les parlementaires et de six au titre de chacune des autres catégories, ainsi répartis :

- deux députés désignés par l'Assemblée nationale et deux sénateurs désignés par le Sénat ;
- des représentants des commissions locales d'information ;
- des représentants d'associations de protection de l'environnement et d'associations mentionnées à l'article L.1114-1 du Code de la santé publique ;
- des représentants des entités responsables d'activités nucléaires ;

- des représentants d'organisations syndicales de salariés représentatives ;
- des personnalités choisies en raison de leur compétence scientifique, technique, économique ou sociale, ou en matière d'information et de communication, dont trois désignées par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, une par l'Académie des sciences et une par l'Académie des sciences morales et politiques ;
- des représentants de l'Autorité de sûreté nucléaire, des services de l'État concernés et de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

Le président du Haut Comité est nommé par décret parmi les parlementaires, les représentants des commissions locales d'information et les personnalités choisies en raison de leur compétence.

Rapports « environnement » des installations nucléaires

Les exploitants sont soumis à des obligations légales d'information, soit générales (comme le rapport environnement prévu par le Code du commerce pour les sociétés par actions), soit spécifiques au domaine nucléaire.

Le Code de l'environnement impose à tout exploitant d'installation nucléaire d'établir chaque année un rapport sur sa situation et les actions qu'il mène, notamment dans le domaine de la surveillance radiologique de l'environnement de son installation. En parallèle, la réglementation impose également aux exploitants la publication d'un rapport environnemental annuel en application des règles générales relatives aux installations nucléaires de base (arrêté du 7 février 2012). « *L'exploitant établit annuellement un rapport présentant l'impact de son installation durant l'année civile écoulée. Ce rapport caractérise les prélèvements d'eau, les rejets d'effluents, la surveillance de l'environnement et les impacts et nuisances occasionnés. Le rapport est transmis, à l'Autorité de sûreté nucléaire, à la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement, à l'Agence régionale de santé, au service chargé de la police de l'eau ainsi qu'à la commission locale d'information.* »

L'ASN procède chaque année à une analyse de ces documents et publie dans son rapport annuel les principales conclusions relatives au traitement des rubriques mentionnées dans la loi, aux éléments stratégiques et à la pédagogie sur la transparence et le droit d'accès à l'information nucléaire.

8.2. DIFFUSION D'INFORMATION DANS LE CADRE DE TRAITÉS OU CONVENTIONS INTERNATIONALES

L'action de l'IRSN en matière d'information sur la surveillance de la radioactivité de l'environnement s'opère également au niveau international notamment dans le cadre du traité Euratom et de la Commission pour la protection du milieu marin de l'Atlantique Nord-Est, dite Commission OSPAR.

La diffusion des données françaises dans le cadre du traité Euratom

Chaque année l'IRSN transmet à la Commission européenne, au nom de l'État français, plusieurs milliers de résultats de mesures de la radioactivité de l'environnement portant sur les particules aérosols, l'eau et le lait, pour satisfaire aux exigences des articles 35 et 36 du traité Euratom. Cet envoi est complété par un déversement automatique des moyennes horaires du débit de dose ambiant mesurées par les sondes du réseau Téléray sur la plateforme EURDEP (*European Radiological Data Exchange Platform*). La Commission européenne édite régulièrement un rapport de synthèse au niveau européen issu de l'exploitation des données transmises par les États membres. Un portail internet public <https://remon.jrc.ec.europa.eu> permet de se connecter aux différentes bases de données de la Commission européenne pour en visualiser les résultats.

Les données transmises à la commission OSPAR

La mission de la convention OSPAR est de protéger l'environnement marin de l'Atlantique du Nord-Est, en prévenant et supprimant la pollution, en protégeant l'environnement marin contre les effets néfastes des activités humaines, et en contribuant à l'usage durable des mers.

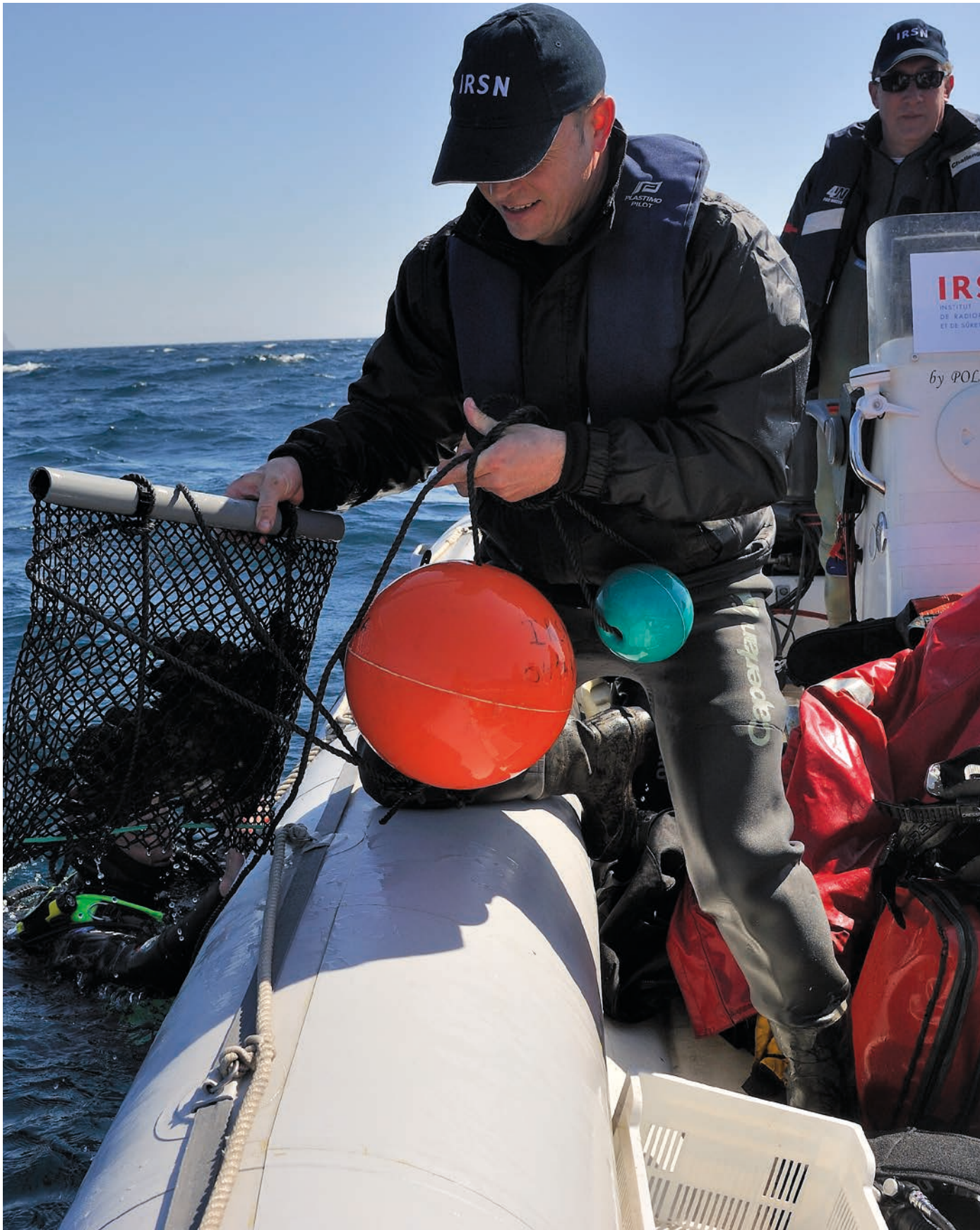
Cette commission est composée de représentants des gouvernements des 15 parties contractantes (Allemagne, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Irlande, Islande, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, Suède et Suisse) et de la Commission européenne, ainsi que d'organisations non gouvernementales.

« L'objectif stratégique de la Commission OSPAR en ce qui concerne les substances radioactives consiste à prévenir la pollution de la zone maritime par les radiations ionisantes, ceci par des réductions progressives et substantielles des rejets, émissions et pertes de substances radioactives, le but ultime étant de parvenir à des concentrations, dans l'environnement qui soient proches des valeurs ambiantes dans le cas des substances radioactives présentes à l'état naturel, et proches de zéro dans celui des substances radioactives de synthèse. »

L'IRSN est impliqué dans les travaux de la Commission OSPAR et transmet des données de radioactivité relatives aux prélèvements marins réalisés sur la façade Atlantique - Manche (eau, sédiments, faune et flore) qui ont été utilisées pour la mise en place d'une « ligne de base », point de référence permettant d'apprécier régulièrement les progrès accomplis depuis 1998 dans la diminution du marquage environnemental imputable aux activités humaines. Ces transmissions de données annuelles sont amenées à se poursuivre.

Enfin, la France rédige périodiquement un rapport incluant également des informations relatives à la surveillance de l'environnement opérée par les exploitants des INB (recommandation PARCOM 91/4) (voir le site <https://www.ospar.org/documents?v=6961>).

Prélèvement d'une poche de moules en mer par un technicien de l'IRSN



© Laurent Zylberman/Graphix-Images/Médiathèque IRSN

09

ANNEXES

9.1. CALCUL DE MOYENNE ET PRISE EN COMPTE DES VALEURS NON SIGNIFICATIVES	382
Cas n° 1 : peu de mesures inférieures au seuil de décision et données homogènes	383
Cas n° 2 : peu de mesures non significatives mais jeu de données hétérogène	383
Cas n° 3 : pourcentage de mesures non significatives élevé	383
9.2. LA REPRÉSENTATION D'INDICATEURS SOUS FORME DE « BOÎTE-À-MOUSTACHES »	384
9.3. MÉTHODE UTILISÉE POUR ESTIMER LES DOSES	385
Données utilisées pour les calculs de doses	385
Prise en compte du bruit de fond radiologique	386
Radionucléides et filiations	386
La grandeur calculée	387
Les voies d'exposition	387
Présentation des scénarios d'exposition et calculs	387
Liste des références	392
9.4. GLOSSAIRE	393
9.5. COMITÉ ÉDITORIAL	401

09

ANNEXES

9.1. 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, cf. chapitre 1.4). 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 :

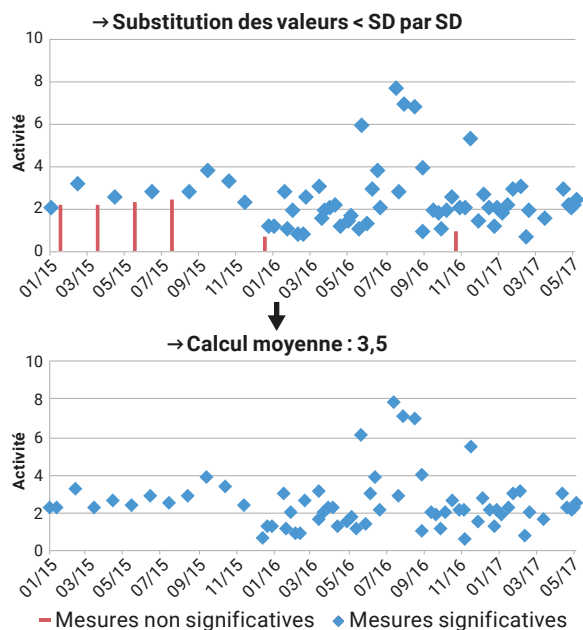
- le nombre de mesures inférieures au seuil de décision (SD) par rapport au nombre de mesures totales ; la littérature est unanime sur le fait qu'au-delà d'un certain pourcentage de mesures non significatives (environ 80 %) il n'existe pas de méthode fiable pour estimer la moyenne de l'échantillon : 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

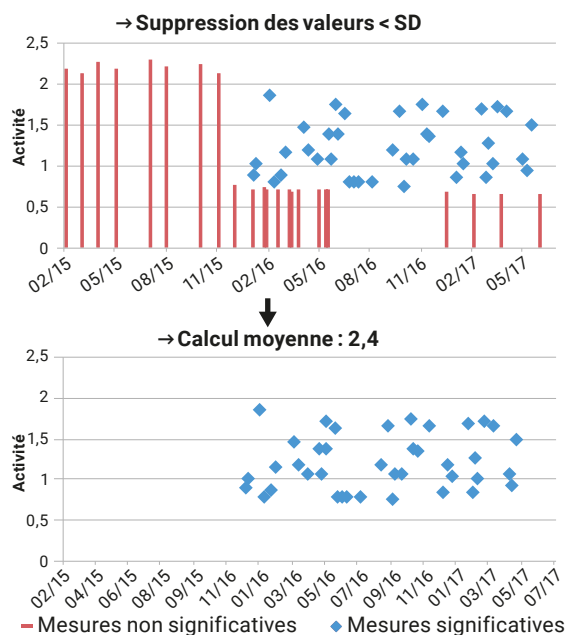
Dans ce cas n° 1, le pourcentage de mesures non significatives est inférieur à 50 % [3], et le jeu de données est homogène.

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.

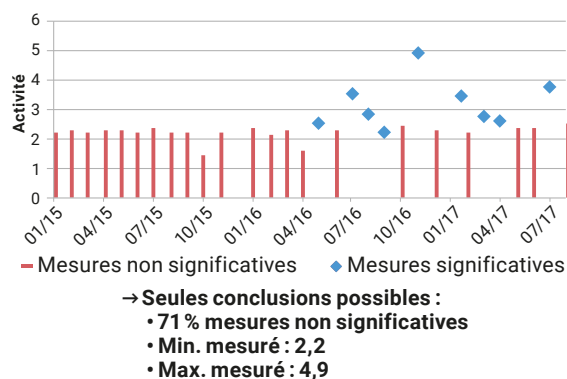


Cas n° 3 : pourcentage de mesures non significatives élevé

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.



9.2. 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.

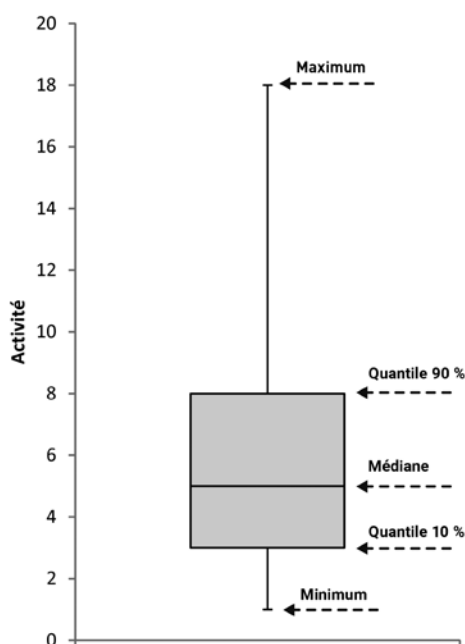
La « boîte-à-moustaches » permet de représenter simultanément plusieurs indicateurs et d'obtenir une vision synthétique et complète de la répartition des résultats de mesures. Habituellement, la « boîte-à-moustaches » fournit des percentiles et notamment une médiane (percentile 50) pour indiquer le centre

de la distribution (50 % des valeurs sont inférieures à la médiane). Ce choix de représentation a été utilisé notamment dans le chapitre 2 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). La moyenne arithmétique telle que présentée précédemment est ajoutée à ces représentations en « boîtes-à-moustaches ».

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 1 / EXEMPLE DE GRAPHIQUE EN « BOÎTE-À-MOUSTACHES »



9.3. 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 :

$$A_{mTOL,denrées(i)} = A_{v,eaucomb(i)} \cdot EQE_{(i)}$$

$$A_{mHTO,denrées(i)} = A_{v,eaudeséchage(i)} \cdot TE_{(i)}$$

TABLEAU 1 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DES ACTIVITÉS DU 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 2 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DES ACTIVITÉS DU 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
$TE_{denrée(i)}$ Tteneur 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 2), ce bruit de fond environnemental est soustrait aux 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, sont calculées selon l'équation [1] avec une valeur de l'activité spécifique du bruit de fond égale à 225 Bq/kg de carbone (cf. chapitre 2).

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 1,0 Bq/L d'eau de combustion ou de déshydratation (cf. chapitre 2).

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 :

$$E_{\text{inh}}(i) = A_v(i) \cdot d_r \cdot t \cdot e_{\text{inh}}(i) \cdot 10^6 \quad [3]$$

TABLEAU 3 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DE LA DOSE INTERNE REÇUE PAR INHALATION

Grandeur	Unité	Valeur retenue	Référence ou explication
$E_{\text{inh}}(i)$ 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)
$e_{\text{inh}}(i)$ 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.

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 au tritium présent dans l'air sous forme HTO est égale à la dose annuelle reçue par inhalation de tritium sous forme HTO.

$$E_{\text{transcutanée}_3\text{H(HTO)}}(i) = E_{\text{inh}_3\text{H(HTO)}} \quad [4]$$

TABLEAU 4 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DE LA DOSE INTERNE REÇUE PAR VOIE TRANSCUTANÉE POUR LE TRITIUM SOUS FORME HTO

Grandeur	Unité
$E_{\text{transcutanée}_3\text{H(HTO)}}$ Dose annuelle reçue par voie transcutanée	μSv/an
$E_{\text{inh}(i)}$ Dose annuelle reçue par inhalation du tritium HTO	μSv/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 :

$$E_{\text{ext}_i\text{immersion}}(i) = A_v(i) \cdot t \cdot e_{\text{immersion}}(i) \cdot 10^6 \quad [5]$$

TABLEAU 5 / GRANDEURS UTILISÉES DANS LE CALCUL DE LA DOSE EXTERNE REÇUE PAR IMMERSION DANS UN GAZ RARE

Grandeur	Unité	Valeur retenue	Référence ou explication
$E_{\text{ext}_i\text{immersion}}(i)$ 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 radionucléide 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 6 et 7) :

$$E_{\text{ing_denrées}}(i) = e_{\text{ing}}(i) \sum_{\text{denrées}_j} (A_{m, \text{denrée}_j}(i) \cdot q_{\text{denrée}_j} \cdot T_{a, \text{denrée}_j}) \cdot 10^6 \quad [6]$$

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 6 / 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 7 / 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		Taux d'auto-consommation	Site de Marcoule		Autre site	
	Régime alimentaire ⁽¹⁾ (kg frais/an ou L/an)	Taux d'auto-consommation ⁽²⁾		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 8) :

$$E_{\text{ing-eau}}(i) = A_v(i) \cdot q_{\text{ing-eau}} \cdot e_{\text{ing}}(i) \cdot 10^6 \quad [7]$$

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 8 / 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.*

9.4. 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). Cf. chapitre 7.

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. Cf. chapitre 2.

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, ceci correspond à des particules de diamètres inférieurs à 100 micromètres, les plus fines n'ayant que quelques fractions de nanomètres.

AFCN

Agence fédérale de contrôle nucléaire (Belgique).

AFNOR

Association française de normalisation.

Alpha (symbole α)

Rayonnement composé de noyaux d'hélium-4, fortement ionisant mais très peu pénétrant. Une simple feuille de papier est suffisante pour arrêter sa propagation. Cf. chapitre 7.

 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. Cf. chapitre 7.

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. Cf. chapitre 7.

Bêta (symbole β)

Rayonnement composé d'électrons de charge négative ou positive. Un écran de quelques mètres d'air ou une simple feuille d'aluminium suffit à l'arrêter. Cf. chapitre 7.

 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

Cf. chapitre 2.

Bruit de fond métrologique

Cf. chapitre 1.3.

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

Cf. chapitre 7.

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

Cf. chapitre 5.

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 EAP_v est un paramètre utilisé pour quantifier physiquement l'énergie qui peut potentiellement se déposer dans les voies respiratoires par désintégration des descendants du radon (cf. chapitre 1.2). Il est utilisé pour la surveillance des travailleurs et des sites miniers. Il s'exprime en J/m^3 (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. Cf. chapitre 7.

Émissaire

Exutoire des effluents rejetés par une installation.

EMM

État-major de la Marine nationale.

Entreposage

Dépôt temporaire (de déchets radioactifs).

Euratom

Ce traité, signé à Rome en 1957, institue la Communauté européenne de l'énergie atomique dont la mission consiste à contribuer, par le développement de l'énergie nucléaire, à la mise en commun des connaissances, des infrastructures et du financement, et à assurer la sécurité d'approvisionnement dans le cadre d'un contrôle centralisé.

EURODIF

Usine européenne d'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse.

Exposition

L'exposition est le fait d'être exposé aux rayonnements ionisants (exposition externe si la source est située à l'extérieur de l'organisme, exposition interne si la source est située à l'intérieur de l'organisme, etc.). Cf. chapitre 7.

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)...

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. Cf. chapitre 7.

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.

Groupe de référence (de la population)

Tel que défini dans la Directive Euratom 96/29 du 13 mai 1999 « Groupe comprenant des personnes dont l'exposition est assez uniforme et représentative de celles des personnes qui, parmi la population, sont plus particulièrement exposées ». Cette notion est remplacée par la notion de « Personne Représentative » définie 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 ».

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.

Minerais

Il s'agit d'une roche contenant des minéraux utiles en proportion suffisamment intéressante pour justifier l'exploitation

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). Cf. 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. Cf. chapitre 7.

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 ; ^{14}C : carbone-14, isotope radioactif du carbone.

Radioprotection

Ensemble de mesures destinées à assurer la protection sanitaire de la population et des travailleurs au regard de l'exposition aux rayonnements ionisants.

Radiothérapie

Utilisation 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. Cf. chapitre 7.

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. Cf. chapitre 1.5.

Sievert (Sv)

Unité légale d'équivalent de dose ou dose efficace qui permet de rendre compte de l'effet biologique produit par une dose absorbée donnée sur un organisme vivant. L'équivalent de dose n'est pas une quantité physique mesurable mais obtenue par le calcul. Elle dépend de l'énergie transmise aux tissus, du type de rayonnement et du tissu traversé. Cf. chapitre 7.

Significatif (mesure ou résultat significatif)

Résultat de mesure supérieur au seuil de décision. Cf. « Seuil de décision » et chapitre 1.5.

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.

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.

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).

9.5. COMITÉ ÉDITORIAL

Coordination éditoriale et réalisation

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
Pôle Santé et Environnement
Direction de l'Environnement

Pilotage

Philippe RENAUD
Lionel SAEY

Rédaction

Christelle ANTONELLI
Miriam BASSO
Magali BEGUIN-LEPRIEUR
Patrick BOYER
Pascale BLANCHART
Cyril HUET
Mélanie HELLER
Olivier MASSON
Gregory MATHIEU
Jean-Michel METIVIER
Maxime MORIN
Christophe MOURLON
Michael PETITFRERE
Olivier PIERRARD
Laurent POURCELOT
Céline QUENNEVILLE
Philippe RENAUD
Sophie REYGROBELLET
Lionel SAEY
Marie SIMON-CORNU

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 2021-00765

Tous droits réservés IRSN

Novembre 2021

Photo de couverture :

© IRSN

Conception graphique-réalisation :

Agence Kazoar - www.kazoar.fr



31, avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

COURRIER

B.P. 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)